

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**CONCRETO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE
CONCRETO – INFLUÊNCIA DA IDADE DE RECICLAGEM NAS
PROPRIEDADES DOS AGREGADOS E CONCRETOS
RECICLADOS**

ALEXANDRE MARQUES BUTTLER

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

Orientador: Prof. Dr. Eloy Ferraz Machado Jr.

São Carlos

2003

A meus pais, Félix Buttler e Maria Amália Marques Buttler, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos difíceis; manifestando companheirismo, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre esteve ao meu lado, guiando-me em todos os momentos e iluminando meu caminho.

Ao Professor Dr. Eloy Ferraz Machado Jr., pela sua orientação e contribuições durante o desenvolvimento da pesquisa.

À minha companheira, Eliandra, que sempre esteve ao meu lado demonstrando apoio, compreensão e, acima de tudo, amor.

Aos professores, Márcio Corrêa e Almir Sales pelas valiosas contribuições no exame de defesa.

Ao Eng. Luís Vareda, pela prestimosa ajuda durante os ensaios laboratoriais e disponibilidade para resolver os problemas que surgiram no desenvolvimento experimental.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia de Estruturas; Amauri, Mário, Fabiano, Juliano e Vladimir pela colaboração durante os ensaios.

Ao amigo Zé Luís do Departamento de Geotecnia, pela ajuda durante a britagem do material.

Às funcionárias do Departamento de Estruturas pelas valiosas colaborações.

Aos amigos; principalmente a Freitas e Fabiana, Júlio, André, Sérgio, Márcio, Daniel, Glauco, Marcelo, Gustavo, Regiane, Fernanda e Isabela, pelos momentos de descontração que passamos juntos.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
RESUMO	XVI
ABSTRACT	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVO PRINCIPAL	5
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.4. JUSTIFICATIVA	7
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	10
2. AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. RECICLAGEM DE CONCRETO	12
2.1.1. GERAÇÃO	12
2.1.2. DEPOSIÇÃO	15
2.1.3. PROCESSOS UTILIZADOS PARA RECUPERAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONCRETO	17
2.1.4. BRITAGEM DO CONCRETO	25
2.1.5. APLICABILIDADE	32
2.1.6. ALGUNS CASOS PRÁTICOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS	33

2.2. CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO	35
2.2.1. A ESTRUTURA DO CONCRETO	35
2.2.1.1. AGREGADO	36
2.2.1.2. MATRIZ (PASTA DE CIMENTO)	37
2.2.2. PROCEDIMENTOS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO ...	39
2.2.3. PROPRIEDADES DO MATERIAL - PESQUISAS COM AGREGADOS RECICLADOS	40
2.2.4. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS	62
3. RETRAÇÃO - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	70
3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE RETRAÇÃO	71
3.1.1. AVALIAÇÃO TEÓRICA DA RETRAÇÃO (ACI 209R-92)	75
3.2. RETRAÇÃO POR SECAGEM	77
3.2.1. FATORES QUE AFETAM A RETRAÇÃO POR SECAGEM ..	79
3.2.2. COMO MINIMIZAR A RETRAÇÃO POR SECAGEM	82
3.2.3. RETRAÇÃO POR SECAGEM - CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO	84
4. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	90
4.1. AGLOMERANTE	91
4.2. AGREGADO MIÚDO NATURAL	92
4.3. AGREGADO GRAÚDO NATURAL	94
4.4. AGREGADO MIÚDO RECICLADO	96
4.5. AGREGADO GRAÚDO RECICLADO	97
5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	99
5.1. METODOLOGIA	99
5.1.1. TRAÇO EMPREGADO	100
5.1.2. PROCESSO PRODUTIVO	101
5.2. PRIMEIRA FASE DA PESQUISA	103
5.2.1. CARACTERÍSTICAS DA PRIMEIRA FASE	103
5.2.2. RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA FASE	105

5.2.2.1. AGREGADOS	105
5.2.2.2. CONCRETO	109
A - CONCRETO COM AGREGADOS NATURAIS	113
A.1 - CONCRETO FRESCO	113
A.2 - CONCRETO ENDURECIDO	114
B - CONCRETO RECICLADO - CR1	115
B.1 - CONCRETO FRESCO	115
B.2 - CONCRETO ENDURECIDO	116
C - CONCRETO RECICLADO - CR7	117
C.1 - CONCRETO FRESCO	117
C.2 - CONCRETO ENDURECIDO	118
D - CONCRETO RECICLADO - CR28	119
D.1 - CONCRETO FRESCO	119
D.2 - CONCRETO ENDURECIDO	120
E - CONCRETO RECICLADO - CRNA28	121
E.1 - CONCRETO FRESCO	121
E.2 - CONCRETO ENDURECIDO	122
5.2.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE	123
5.2.3.1. AGREGADOS	123
A - AGREGADOS MIÚDOS	124
B - AGREGADOS GRAÚDOS	126
B.1 - GRANULOMETRIA	127
B.2 - MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA	128
B.3 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS	131
B.4 - ABRASÃO LOS ANGELES	134
5.2.3.2. CONCRETO	136
A - CONCRETO FRESCO	137
A.1 - CONSISTÊNCIA	137
A.2 - MASSA ESPECÍFICA	139
B - CONCRETO ENDURECIDO	140
B.1 - MASSA ESPECÍFICA	140
B.2 - ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS	141
B.3 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	144
B.4 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	150
B.5 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	153
5.3. SEGUNDA FASE DA PESQUISA	156
5.3.1. RESULTADOS DA SEGUNDA FASE	167
5.3.1.1. CONCRETO COM AGREGADOS NATURAIS - REFERÊNCIA	167
5.3.1.2. CONCRETO RECICLADO - R1	168
5.3.1.3. CONCRETO RECICLADO - R7	169
5.3.1.4. CONCRETO RECICLADO - R28	170
5.3.1.5. CONCRETO RECICLADO - RNA28	171
5.3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SEGUNDA FASE	171

6. CONCLUSÃO	181
7. SUGESTÕES PARA O PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA	185
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187

LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 2.1 – Equipamento utilizado para a reciclagem do concreto fresco</i>	18
<i>FIGURA 2.2 – Concreto residual sendo entregue a planta de reciclagem .</i>	19
<i>FIGURA 2.3 – Tanque com agitadores</i>	20
<i>FIGURA 2.4 – Saída dos agregados na calha de descarga</i>	20
<i>FIGURA 2.5 – Britador portátil de baixa capacidade de produção</i>	26
<i>FIGURA 2.6 – Britador portátil de média capacidade de produção</i>	26
<i>FIGURA 2.7 – Britador autopropelido de alta capacidade de produção</i>	27
<i>FIGURA 2.8 – Britador de cones</i>	27
<i>FIGURA 2.9 – Britador de mandíbula</i>	28
<i>FIGURA 2.10 – Britador de mandíbula com alta capacidade de produção.</i>	28
<i>FIGURA 2.11 – Circuito fechado de britagem</i>	29
<i>FIGURA 2.12 – Planta móvel para a produção de reciclados</i>	30
<i>FIGURA 2.13 – Esquema de funcionamento da planta móvel</i>	31
<i>FIGURA 2.14 – Planta fixa para a produção de agregados reciclados</i>	31
<i>FIGURA 2.15 – Microestrutura do concreto</i>	35
<i>FIGURA 2.16 – Microestrutura do concreto reciclado</i>	36
<i>FIGURA 2.17 – Relação entre a resistência à compressão do concreto original e a resistência à compressão do concreto reciclado</i>	50
<i>FIGURA 2.18 – Painel acústico confeccionado com concreto reciclado</i>	55
<i>FIGURA 3.1 – Comparação entre o concreto de cimento Portland e o concreto com retração compensada</i>	84
<i>FIGURA 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural</i>	93
<i>FIGURA 4.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural</i>	95
<i>FIGURA 5.1 – Betoneira utilizada na pesquisa</i>	102
<i>FIGURA 5.2 – Máquina “Los Angeles” (Departamento de Transportes)</i>	109

<i>FIGURA 5.3 – Prensa hidráulica utilizada nos ensaios</i>	<i>111</i>
<i>FIGURA 5.4 – Sistema de aquisição de dados – Ensaio de módulo de deformação</i>	<i>112</i>
<i>FIGURA 5.5 – Extensômetros elétricos posicionados no corpo-de-prova ..</i>	<i>112</i>
<i>FIGURA 5.6 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos</i>	<i>125</i>
<i>FIGURA 5.7 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos</i>	<i>127</i>
<i>FIGURA 5.8 – Resultados relativos para as propriedades de massa unitária e específica</i>	<i>129</i>
<i>FIGURA 5.9 – Absorção dos agregados</i>	<i>132</i>
<i>FIGURA 5.10 – Abrasão Los Angeles</i>	<i>134</i>
<i>FIGURA 5.11 – Resultados relativos para as propriedades de absorção de água, índice de vazios e abrasão Los Angeles</i>	<i>135</i>
<i>FIGURA 5.12 – Comportamento da massa específica em função da absorção de água</i>	<i>143</i>
<i>FIGURA 5.13 – Gráfico de resistência à compressão para as dosagens ...</i>	<i>145</i>
<i>FIGURA 5.14 – Microestrutura do concreto reciclado</i>	<i>147</i>
<i>FIGURA 5.15 – Resultados relativos para as propriedades do concreto no estado endurecido</i>	<i>155</i>
<i>FIGURA 5.16 – Prismas dispostos na câmara úmida</i>	<i>157</i>
<i>FIGURA 5.17 – Fôrmas utilizadas para a moldagem dos prismas</i>	<i>157</i>
<i>FIGURA 5.18 – Insertos utilizados</i>	<i>158</i>
<i>FIGURA 5.19 – Insertos posicionados nas fôrmas</i>	<i>159</i>
<i>FIGURA 5.20 – Aparelho comparador de comprimentos</i>	<i>159</i>
<i>FIGURA 5.21 – Diferenças entre a leitura do aparelho e àquela que será utilizada para a retração</i>	<i>160</i>
<i>FIGURA 5.22 – Prisma disposto no aparelho comparador de comprimentos</i>	<i>161</i>
<i>FIGURA 5.23 – Câmara climatizada do Departamento de Estruturas</i>	<i>161</i>
<i>FIGURA 5.24 – Layout da câmara climatizada</i>	<i>162</i>
<i>FIGURA 5.25 – Equipamentos de refrigeração aquecimento da câmara ...</i>	<i>163</i>
<i>FIGURA 5.26 – Desumidificadores da câmara climatizada</i>	<i>163</i>
<i>FIGURA 5.27 – Sensores da câmara climatizada</i>	<i>164</i>

<i>FIGURA 5.28 – Tela principal do programa de controle</i>	<i>164</i>
<i>FIGURA 5.29 – Sistema de controle e quadro analógico</i>	<i>165</i>
<i>FIGURA 5.30 – Vista dos prismas logo após a moldagem</i>	<i>165</i>
<i>FIGURA 5.31 – Prismas dispostos na câmara climatizada</i>	<i>166</i>
<i>FIGURA 5.32 – Desenvolvimento da retração por secagem para os concretos estudados</i>	<i>175</i>
<i>FIGURA 5.33 – Resultados relativos para a propriedade de retração por secagem</i>	<i>177</i>
<i>FIGURA 5.34 – Resultados de retração obtidos experimentalmente x Resultados teóricos do ACI</i>	<i>178</i>

LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 2.1 – Composição de agregados nas dosagens dos concretos (GONÇALVES, 2000)</i>	<i>52</i>
<i>TABELA 2.2 – Propriedades físicas dos agregados reciclados e do agregado natural (PADMINI et al., 2002)</i>	<i>56</i>
<i>TABELA 2.3 – Resultados obtidos para os blocos de concreto (POON et al., 2002)</i>	<i>58</i>
<i>TABELA 2.4 – Resultados obtidos para os blocos de pavimentação (POON et al., 2002)</i>	<i>58</i>
<i>TABELA 2.5 – Resultados obtidos para os blocos de pavimentação com a adição de cinza volante (POON et al., 2002)</i>	<i>59</i>
<i>TABELA 2.6 – Propriedades dos resíduos de concreto (RYU, 2002)</i>	<i>60</i>
<i>TABELA 2.7 – Classe de resistência permitida (RILEM, 1994)</i>	<i>63</i>
<i>TABELA 2.8 – Coeficientes de projeto para o concreto reciclado (RILEM, 1994)</i>	<i>64</i>
<i>TABELA 3.1 – Fatores de correção com relação à espessura média do prisma</i>	<i>76</i>
<i>TABELA 3.2 – Efeito da composição da pasta de cimento com agregados de dolomita de diversas granulometrias (FURNAS, 1997)</i>	<i>80</i>
<i>TABELA 3.3 – Influência do plano de cura na retração por secagem (FURNAS, 1997)</i>	<i>81</i>
<i>TABELA 3.4 – Resultados de retração por secagem para blocos de concreto e pavimentação (POON et al., 2002)</i>	<i>89</i>
<i>TABELA 4.1 – Teores dos componentes do cimento Portland com escória – NBR 5732</i>	<i>91</i>
<i>TABELA 4.2 – Exigências químicas prescritas para o cimento Portland com escória – NBR 5732</i>	<i>91</i>
<i>TABELA 4.3 – Exigências físicas e mecânicas (HOLCIM, 2003 e NBR</i>	

5732)	92
TABELA 4.4 – Composição granulométrica do agregado miúdo natural – NBR 7217/87	93
TABELA 4.5 – Composição granulométrica do agregado graúdo natural – NBR 7217/87	94
TABELA 4.6 – Propriedades físicas do agregado graúdo natural	95
TABELA 4.7 – Composições granulométricas dos agregados miúdos reciclados analisados	97
TABELA 5.1 – Dosagens utilizadas nas pesquisas	101
TABELA 5.2 – Ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura	101
TABELA 5.3 – Ensaio referentes aos agregados	105
TABELA 5.4 – Propriedades mecânicas do concreto original – referência .	106
TABELA 5.5 – Porcentagens de agregados graúdos e miúdos para cada agregado reciclado	106
TABELA 5.6 – Composições granulométricas dos agregados graúdos reciclados	107
TABELA 5.7 – Propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados	108
TABELA 5.8 – Ensaio referentes ao concreto fresco e endurecido	109
TABELA 5.9 – Massa específica dos materiais utilizados na pesquisa	110
TABELA 5.10 – Consumo teórico de cimento e teor de argamassa seca ..	111
TABELA 5.11 – Resultados dos ensaios para o concreto de referência no estado fresco	113
TABELA 5.12 – Propriedades do concreto de referência no estado endurecido	114
TABELA 5.13 – Resistência à compressão – Concreto com agregados naturais	114
TABELA 5.14 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto com agregados naturais	115
TABELA 5.15 – Módulo de deformação secante para o concreto com agregados naturais	115

<i>TABELA 5.16 – Resultados dos ensaios para o concreto reciclado CR1 no estado fresco.....</i>	<i>116</i>
<i>TABELA 5.17 – Propriedades do concreto reciclado CR1 no estado endurecido</i>	<i>116</i>
<i>TABELA 5.18 – Resistência à compressão – Concreto reciclado CR1</i>	<i>116</i>
<i>TABELA 5.19 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto reciclado CR1.....</i>	<i>117</i>
<i>TABELA 5.20 – Módulo de deformação secante para o concreto reciclado CR1</i>	<i>117</i>
<i>TABELA 5.21 – Resultados dos ensaios para o concreto reciclado CR7 no estado fresco</i>	<i>118</i>
<i>TABELA 5.22 – Propriedades do concreto reciclado CR7 no estado endurecido</i>	<i>118</i>
<i>TABELA 5.23 – Resistência à compressão – Concreto reciclado CR7</i>	<i>118</i>
<i>TABELA 5.24 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto reciclado CR7</i>	<i>119</i>
<i>TABELA 5.25 – Módulo de deformação secante para o concreto reciclado CR7</i>	<i>119</i>
<i>TABELA 5.26 – Resultados dos ensaios para o concreto reciclado CR28 no estado fresco</i>	<i>120</i>
<i>TABELA 5.27 – Propriedades do concreto reciclado CR28 no estado endurecido</i>	<i>120</i>
<i>TABELA 5.28 – Resistência à compressão – Concreto reciclado CR28</i>	<i>120</i>
<i>TABELA 5.29 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto reciclado CR28</i>	<i>121</i>
<i>TABELA 5.30 – Módulo de deformação secante para o concreto reciclado CR28</i>	<i>121</i>
<i>TABELA 5.31 – Resultados dos ensaios para o concreto reciclado CRNA28 no estado fresco</i>	<i>122</i>
<i>TABELA 5.32 – Propriedades do concreto reciclado CRNA28 no estado endurecido</i>	<i>122</i>
<i>TABELA 5.33 – Resistência à compressão – Concreto reciclado CRNA28</i>	<i>122</i>

<i>TABELA 5.34 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto reciclado CRNA28</i>	<i>123</i>
<i>TABELA 5.35 – Módulo de deformação secante para o concreto reciclado CRNA28</i>	<i>123</i>
<i>TABELA 5.36 – Porcentagens de agregados graúdos e miúdos para cada agregado reciclado</i>	<i>126</i>
<i>TABELA 5.37 – Massa unitária e massa específica dos agregados graúdos (kg/dm³)</i>	<i>128</i>
<i>TABELA 5.38 – Absorção de água e índice de vazios</i>	<i>131</i>
<i>TABELA 5.39 – Principais características das dosagens da pesquisa</i>	<i>136</i>
<i>TABELA 5.40 – Relações água/cimento e valores de consistência pelo abatimento de tronco de cone para cada uma das dosagens</i>	<i>137</i>
<i>TABELA 5.41 – Massa específica do concreto no estado fresco</i>	<i>139</i>
<i>TABELA 5.42 – Massa específica do concreto no estado endurecido</i>	<i>140</i>
<i>TABELA 5.43 – Absorção de água e índice de vazios</i>	<i>142</i>
<i>TABELA 5.44 – Valores de resistência à compressão aos 7 e 28 dias para as dosagens</i>	<i>145</i>
<i>TABELA 5.45 – Comparação entre os resultados de resistência à compressão para os concretos CR1 e CR28</i>	<i>147</i>
<i>TABELA 5.46 – Relação entre a resistência à compressão dos concretos com agregados graúdos reciclados pelos naturais</i>	<i>149</i>
<i>TABELA 5.47 – Valores de resistência à tração aos 7 dias e 28 dias para as dosagens</i>	<i>150</i>
<i>TABELA 5.48 – Comparação entre os resultados de resistência à tração para os concretos R1 e R28</i>	<i>151</i>
<i>TABELA 5.49 – Valores do módulo de deformação para as dosagens utilizadas</i>	<i>153</i>
<i>TABELA 5.50 – Retração por secagem do concreto com agregados naturais</i>	<i>167</i>
<i>TABELA 5.51 – Retração por secagem do concreto reciclado CR1.....</i>	<i>168</i>
<i>TABELA 5.52 - Retração por secagem do concreto reciclado CR7.....</i>	<i>169</i>
<i>TABELA 5.53 - Retração por secagem do concreto reciclado CR28.....</i>	<i>170</i>

<i>TABELA 5.54 - Retração por secagem do concreto reciclado CRNA28.....</i>	<i>171</i>
<i>TABELA 5.55 – Fatores de correção e suas respectivas equações</i>	<i>172</i>
<i>TABELA 5.56 – Fatores de correção para cada uma das dosagens</i>	<i>172</i>
<i>TABELA 5.57 – Deformação última teórica para as dosagens estudadas .</i>	<i>173</i>
<i>TABELA 5.58 – Resultados teóricos de retração aplicando as prescrições do ACI 209R-92</i>	<i>173</i>
<i>TABELA 5.59 – Valores de retração obtidos experimentalmente</i>	<i>174</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABESC	- Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ACI	- American Concrete Institute
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CEB	- Comitê Euro-International du Béton
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
DECC/USP	- Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP
DIN	- Deutsches Institut für Normung e.V.
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
FINEP	- Financiadora de Estudos e Projetos
NBR	- Norma Brasileira Registrada
NEN	- Nederlands Normalisatie - Instituut
ONU	- Organização das Nações Unidas
PBR	- Programa Brasileiro de Reciclagem
RILEM	- Réunion Internationale des Laboratoires d'Éssais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions

LISTA DE SÍMBOLOS

α	- teor de argamassa seca
a/c	- relação água/cimento
CPII-E-32	- cimento Portland Composto por Escória, com área específica de 320 m ² /kg Blaine
C	- consumo de cimento teórico, kg/m ³
D.M	- dimensão máxima característica, mm
ε	- expansão ou retração por secagem, %
E_{sec}	- módulo de deformação secante do concreto, GPa
f_{cj}	- resistência à compressão, MPa
f_{cm}	- resistência média à compressão, MPa
f_{tj}	- resistência à tração, MPa
f_{tm}	- resistência média à tração, MPa
MF	- módulo de finura
GR1	- agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi reciclado com a idade de 1 dia
GR7	- agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi reciclado com a idade de 7 dias
GR28	- agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi reciclado com a idade de 28 dias

GRNA28	- agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto não-adensado, o qual foi reciclado com a idade de 28 dias
CR1	- concreto confeccionado com o agregado graúdo reciclado GR1 e agregado miúdo natural
CR7	- concreto confeccionado com o agregado graúdo reciclado GR7 e agregado miúdo natural
CR28	- concreto confeccionado com o agregado graúdo reciclado GR28 e agregado miúdo natural
CRNA28	- concreto confeccionado com o agregado graúdo reciclado GRNA28 e agregado miúdo natural
MR1	- agregado miúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi reciclado com a idade de 1 dia
MR7	- agregado miúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi reciclado com a idade de 7 dias
MR28	- agregado miúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi reciclado com a idade de 28 dias
MRNA28	- agregado miúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto não-adensado, o qual foi reciclado com a idade de 28 dias
γ_{cf}	- massa específica do concreto no estado fresco, kg/dm ³
γ_s	- massa específica na condição seca, kg/dm ³
γ_{sss}	- massa específica na condição saturada superfície seca, kg/dm ³

RESUMO

BUTTLER, A. M. (2003). Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto – Influência da Idade de Reciclagem nas Propriedades dos Agregados e Concretos Reciclados. São Carlos, 2003. 199p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os resíduos de concreto apresentam grande potencial para serem reciclados quando comparados com outros resíduos, entretanto, o número de estudos realizados no Brasil é muito pequeno dificultando a utilização deste material em dosagens estruturais. Em virtude disso, desenvolveu-se um estudo teórico-experimental visando caracterizar algumas propriedades do agregado e do concreto reciclado; no estudo teórico exploraram-se aspectos relacionados à geração, deposição, processos para recuperação, britagem, casos práticos, pesquisas envolvendo reciclados de concreto e as recomendações normativas existentes. No desenvolvimento experimental, analisou-se a influência do período decorrido entre a moldagem e a reciclagem do concreto nas propriedades dos agregados e concretos. Os resultados indicam que resíduos reciclados logo após sua geração, contribuem positivamente para as propriedades mecânicas do concreto, devido à existência de grande quantidade de partículas não-hidratadas de cimento, tais concretos obtiveram resultados superiores para a resistência à compressão e tração quando comparados aos concretos com agregados naturais.

Palavras-chave: agregado reciclado; retração por secagem; reciclagem; concreto reciclado.

ABSTRACT

BUTTLE, A. M. (2003). Concrete with Recycled Concrete Coarse Aggregates - Influence of Age of Recycling in the Properties of Recycled Aggregates and Concretes. São Carlos, 2003. 199p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The concrete residues show a large potential for be recycled when compared with other residues; however, the number of studies in Brazil is very small hindering the use of this material in structural dosage. By virtue of that, it was developed a theoretical-experimental study to characterize some properties of the aggregate and of the recycled concrete; in the theoretical study it was explored aspects related to the generation, deposition, processes for recovery, crushing, practical cases, researches involving recycled of concrete and the existent normative recommendations. In the experimental development, it was analyzed the influence of the period elapsed between the molding and the recycling of the concrete in the properties of the aggregates and concretes. The results indicate that residues recycled soon after generation, these contribute positively to the mechanical properties of the concrete due to the existence of large amount of nonhydrated cement particles, such concretes obtained results superiors for the compression strenght and tensile strenght when compared to the concretes with natural aggregates.

Keywords: recycled aggregate; drying shrinkage; recycling; recycled concrete.

INTRODUÇÃO

1 Capítulo

1.1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos em um processo de fabricação é praticamente inevitável. Quando não há uma tecnologia apropriada para o reaproveitamento ou reciclagem de um resíduo, certamente esse material será depositado na natureza e poderá ocasionar inúmeros problemas para o meio-ambiente. Em certas situações, o problema talvez não seja a falta de tecnologia para a reciclagem, mas sim a falta de uma legislação mais rigorosa que puna os responsáveis pela deposição dos resíduos na natureza. A falta de conscientização da população com relação a essa questão também agrava o problema, uma vez que a solução não depende apenas de ações unilaterais.

No contexto da indústria da construção civil, a quantidade de resíduos gerados alcança níveis alarmantes. Várias pesquisas sobre perdas na construção foram realizadas no Brasil; dentre algumas das revelações

destas pesquisas, destaca-se a grande variação na perda de materiais entre diferentes empresas, algumas vezes da ordem de 100%. Essa variação revela um grande potencial para a redução das perdas sem mudança no processo tecnológico. Através de dados obtidos pelo programa financiado pelo HABITARE (2002), que avaliou as perdas médias em atividades de construção, pode-se estimar que se as perdas fossem reduzidas para 6% (valor mínimo encontrado pela pesquisa) seria possível aumentar a produção de edifícios em cerca de 25%.

Outra questão que atinge níveis preocupantes é a extração de matérias-primas. O consumo de materiais naturais está crescendo na mesma proporção do crescimento da economia e da população; segundo MATTOS & WAGNER (1999), entre 1970 e 1995, o consumo de materiais no mundo cresceu de 5,7 bilhões de toneladas para 9,5 bilhões de toneladas. Devido a esse crescimento exagerado, as reservas de muitos materiais começam a ficar escassas, especialmente nas grandes cidades aonde já é necessário extrair algumas matérias-primas a distâncias cada vez maiores. Conjuntamente, pode-se citar o problema da deterioração ambiental que está gerando problemas ecológicos nas áreas de proteção ambiental.

Várias iniciativas em relação à disposição e reutilização dos resíduos da construção civil merecem destaque. Na Holanda, existem regulamentações que servem como importante instrumento para incentivar a reciclagem de resíduos, proibindo a deposição de resíduos de construção e demolição no meio-ambiente. Na Inglaterra, o Estado cobra uma taxa de todo o entulho que é gerado na obra e impõe elevadas taxas para a exploração de agregados naturais visando incentivar a utilização de materiais reciclados. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002) publicou uma resolução que dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil e que entrou em vigor no início de 2003.

Dentre os vários resíduos da construção civil, podemos citar os resíduos de concreto como tendo um dos maiores potenciais de utilização, devido ao conhecimento de suas propriedades básicas (fc, idade, etc) e, seu menor grau de contaminação por outros materiais quando comparado com outros resíduos da construção. Os principais agentes geradores de resíduos de concreto são as fábricas de pré-moldados, usinas de concreto pré-misturado, demolições de construções e pavimentos rodoviários.

Os Estados Unidos investiram consideravelmente com o objetivo de desenvolver tecnologia para o reaproveitamento de resíduos de concreto provenientes de pavimentos rodoviários. Além dos benefícios ecológicos, a utilização desses agregados reciclados representa uma redução do custo envolvido com o transporte e cria, também, uma nova forma de comércio, a dos resíduos, que gera importante receita anual. Segundo a ASSOCIATED GENERAL CONTRACTORS (2001), nos Estados Unidos, entre 1994 e 1996, a utilização de agregados reciclados de concreto aumentou cerca de 170%, sendo que cerca de 320km de pavimentos de concreto foram reciclados anualmente nesse período. Aproximadamente, quarenta e quatro estados americanos utilizam concreto reciclado como base para rodovias e muitos desses estados possuem recomendações normativas disciplinando o uso do material.

Numa fábrica de pré-moldados, o concreto desperdiçado é proveniente de elementos rejeitados pelo controle de qualidade, final de linhas de produção e sobras de concreto fresco ao final do processo. Basicamente há duas fontes de resíduos: os resíduos provenientes de concretos que foram adensados e os resíduos de concretos não-adensados. Segundo ELLIOT (2000), é esperado que o custo de deposição desses elementos no meio-ambiente aumente consideravelmente devido à existência de regulamentações mais rígidas.

Outra fonte de resíduos de concreto são as usinas de concreto pré-misturado ou centrais dosadoras. O concreto desperdiçado nessas centrais

pode ser atribuído a diversas fontes; seja pelo retorno de sobras de concreto nos caminhões betoneira, bomba de concreto ou pela lavagem dos caminhões e instalações da central. Segundo REZENDE (1995), na Alemanha, o desperdício de concreto pré-misturado varia de um a quatro por cento em relação ao volume total dosado.

Num recente estudo coordenado pelo DECC/USP (1996), o índice médio de desperdício de concreto dosado em central ficou em cerca de nove por cento. Algumas estimativas da ABESC (2001), para a região metropolitana de São Paulo apontam para um volume de cerca de 3.500m^3 a 7.000m^3 de concreto residual gerados mensalmente nas centrais dosadoras. No Brasil, o setor de centrais dosadoras é composto por cerca de 130 empresas com aproximadamente 600 centrais, dosando um volume anual de $9.500.000\text{m}^3$ de concreto. Estimando um índice médio de perdas igual a nove por cento para o concreto dosado nessas centrais, o volume total desperdiçado chega a 855.000m^3 .

Um dos métodos existentes para a reciclagem do concreto fresco é a separação dos agregados e a reciclagem da água de lavagem (partículas de cimento + finos em suspensão); após o processo de separação, tanto o agregado quanto a água são reutilizados em novas dosagens. Para a recuperação do concreto desperdiçado há outro método no qual a reciclagem é efetuada para o concreto já no estado endurecido. Esse processo baseia-se na passagem do concreto plástico para o concreto endurecido por um curto período de tempo; após esse período, o concreto seria reciclado visando utilizar o agregado para novas misturas. Nesse método em que se avalia a influência do tempo de cura para a produção de resíduos, espera-se que as partículas de cimento não-hidratadas presentes nos agregados reciclados contribuam positivamente para a quantidade de cimento nas novas misturas. Sendo a hidratação, um processo dependente do tempo, haveria uma duração ótima depois da qual o concreto poderia ser reciclado e, nesse mesmo tempo, conteria a maior porcentagem de partículas de cimento não-hidratadas que contribuiriam positivamente para

as propriedades dos agregados reciclados e para os concretos confeccionados com esses agregados (RASHWAN & ABOURISK, 1997).

Um dos principais problemas dos concretos com agregados reciclados são suas propriedades de deformabilidade quando comparados com o concreto confeccionado com agregados naturais. As propriedades de deformabilidade do material (módulo de elasticidade, retração por secagem e fluência), especialmente a retração por secagem, devem ser avaliadas mais detalhadamente visando à correta aplicação do material. Inúmeros pesquisadores relatam que concretos com agregados graúdos reciclados apresentam uma retração por secagem de 30% a 60% maior se comparada com os resultados obtidos para concretos com agregados naturais.

De maneira geral, as pesquisas e tecnologias para o reaproveitamento dos resíduos de concreto no Brasil, ainda estão começando e os principais estudos estão relacionados com a reciclagem de entulho de construção e demolição que possui propriedades totalmente diferentes. Dentro desse contexto, torna-se importante conhecer as propriedades físicas dos agregados reciclados e dos concretos confeccionados com esses agregados, com o objetivo de viabilizar sua utilização.

1.2. OBJETIVO PRINCIPAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar a retração por secagem de concretos confeccionados com agregados graúdos reciclados de concreto comparando-a com a retração por secagem de concretos com agregados naturais. Além disso, nesta pesquisa será estudada a influência do período decorrido entre a moldagem e a reciclagem do concreto, nas propriedades físicas dos agregados reciclados e nas propriedades físicas e

mecânicas dos concretos confeccionados com esses agregados reciclados comparando-as com as propriedades dos agregados naturais e dos concretos confeccionados com agregados naturais.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa podem ser resumidos nos itens a seguir:

- Analisar a influência do período decorrido entre a moldagem e a reciclagem do concreto (1, 7 e 28 dias) nas propriedades físicas dos agregados reciclados (granulometria, absorção, massa unitária no estado solto, massa unitária no estado compactado, massa específica, índice de vazios e abrasão Los Angeles) e compará-las com as propriedades dos agregados naturais.
- Analisar a influência do período decorrido entre a moldagem e a reciclagem do concreto (1, 7 e 28 dias) nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos confeccionados com os agregados graúdos reciclados e compará-las com as propriedades físicas e mecânicas dos concretos com agregados naturais.
- Analisar as propriedades físicas dos agregados reciclados provenientes de concretos não-adensados que foram reciclados depois de decorridos 28 dias da moldagem e compará-las com as propriedades dos agregados naturais.
- Analisar as propriedades físicas e mecânicas dos concretos que incorporam os agregados graúdos reciclados provenientes de resíduos de concretos não-adensados e compará-las com as

propriedades físicas e mecânicas dos concretos com agregados naturais.

- Analisar a influência do período decorrido entre a moldagem e a reciclagem do concreto (1, 7 e 28 dias) na retração por secagem de prismas confeccionados com agregados graúdos reciclados e compará-los com a retração por secagem de prismas confeccionados com agregados naturais.
- Analisar a retração por secagem do concreto com agregados graúdos reciclados provenientes de resíduos de concretos não-adensados e compará-los com os resultados de retração por secagem do concreto com agregados naturais.
- Comparar os valores experimentais obtidos para a retração por secagem com os valores teóricos encontrados na literatura (manual 209R-92 do ACI).

1.4. JUSTIFICATIVA

Os resíduos de concreto possuem um grande potencial para serem reutilizados como matéria-prima; tais resíduos apresentam vantagens significativas em relação aos demais resíduos devido ao conhecimento das propriedades do material de origem. Entretanto, apesar de inúmeras pesquisas desenvolvidas no exterior atestarem o grande potencial do material, o Brasil ainda carece de pesquisas que sirvam como ferramenta para a utilização desse material; acrescenta-se a isso, a falta de informação por parte da população e a falta de regulamentações que punam os responsáveis por despejar resíduos no meio-ambiente. Felizmente, este panorama poderá mudar com a disposição do CONAMA (2002) que trata

sobre a gestão dos resíduos da construção civil e que entrou em vigor em janeiro de 2003.

A utilização dos resíduos de concreto como agregado para novas dosagens implicará em redução dos custos envolvidos com a exploração e transporte dos agregados naturais e, além disso, reduzirá substancialmente o volume de resíduos despejados no meio-ambiente. Acrescenta-se a isso, o fato que inúmeros países já lucraram com uma nova atividade econômica, o comércio de resíduos.

Em países, como a Holanda, as atividades de pesquisa e desenvolvimento na área de reciclagem romperam as barreiras das universidades e, se transformaram em excelente negócio para um significativo número de empresas privadas. Deve-se destacar também que nesse país, a existência de legislações que contemplem os resíduos foi a responsável pelo índice de reaproveitamento chegar a 80% em relação a todos os resíduos gerados. No Japão, segundo TOMOSAWA & NOGUCHI (1996) está surgindo o conceito de concreto totalmente reciclável, no qual todos os materiais provenientes do processo de reciclagem são utilizados como matéria-prima para a produção de um novo concreto.

Durante a pesquisa bibliográfica, contatou-se a existência de inúmeros artigos relacionados ao tema. No Brasil, a situação é um pouco diferente com a grande maioria dos artigos tratando da reciclagem do entulho que apresenta propriedades totalmente distintas dos resíduos de concreto. Dessa forma, achou-se importante analisar experimentalmente as propriedades dos agregados reciclados e dos concretos produzidos com esses agregados e, numa última análise, comparar com os resultados obtidos por outros pesquisadores. Além disso, achou-se conveniente estudar resíduos de concreto que fossem provenientes de concretos de média resistência (40MPa-50MPa) e que apresentassem elevado consumo de cimento simulando, dessa forma, o comportamento em uma fábrica de elementos pré-moldados que emprega concretos de resistência elevada.

Segundo alguns pesquisadores, os agregados reciclados provenientes de concretos de média e alta resistência possuem certas propriedades aglomerantes e, geralmente os resultados advindos da utilização desses agregados são superiores aos obtidos por agregados provenientes de resíduos de concreto de resistência inferior.

Outro ponto relevante da pesquisa foi o estudo de resíduos de concreto provenientes de usinas de concreto pré-misturado e fábricas de pré-moldados. Pela bibliografia consultada, pode-se constatar que o índice de desperdício nesses locais não é desprezível e que a utilização de britadores de pequena capacidade visando reciclar os resíduos gerados nesses locais poderia ser altamente viável. Uma vez que com a utilização desses britadores, os resíduos de concreto poderiam ser reciclados imediatamente após sua geração, originando agregados com grande quantidade de cimento não-hidratado, os quais quando empregados na produção de novos concretos poderiam trazer resultados muito satisfatórios e superiores aos obtidos para concretos com agregados reciclados convencionais devido à presença dessa elevada quantidade de cimento não-hidratado.

As propriedades de deformabilidade do concreto reciclado também merecem especial atenção, com destaque para a retração por secagem. A retração por secagem em estruturas de concreto é um fenômeno inevitável ao concreto, sendo uma das principais causas da fissuração e a ocorrência desta última, está ligada diretamente à durabilidade do concreto. Inúmeros pesquisadores relatam que concretos com agregados graúdos reciclados apresentam uma retração por secagem de 30 a 60% maior se comparada com os resultados obtidos para concretos com agregados naturais. Dentro desse contexto, achou-se conveniente estudar essa propriedade que é parte essencial para o bom desempenho de uma estrutura de concreto frente aos requisitos de durabilidade.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 são apresentados inúmeros aspectos relacionados à reciclagem do concreto; geração, disposição, processos para recuperação, métodos para britagem, aplicabilidade e alguns casos práticos da utilização de reciclados de concreto. Neste Capítulo, também são expostos aspectos relacionados à microestrutura do concreto reciclado, influência dos procedimentos a serem adotados na produção do concreto reciclado; numa segunda etapa são apresentados os trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores, recomendações normativas e decretos tratando dos resíduos de concreto.

No Capítulo 3 é feita uma extensão revisão bibliográfica abrangendo todos os tipos de retração. Posteriormente, investigam-se as causas da retração por secagem, fatores que a afetam e meios que podem ser empregados para minimizá-la. A retração por secagem de concretos reciclados é tratada através da revisão de inúmeros artigos relacionados.

No Capítulo 4 são caracterizados todos os materiais que foram empregados no desenvolvimento experimental da pesquisa. Determinam-se algumas das propriedades físicas dos agregados miúdos e graúdos e, para o aglomerante são apresentadas suas características físicas e mecânicas.

No Capítulo 5 são apresentados os desenvolvimentos experimentais da primeira e segunda fase. Na metodologia, encontra-se o traço e o processo produtivo empregado; para as duas fases são apresentadas as suas características, os resultados advindos dos ensaios e, finalmente, as análises estabelecidas comparativamente com os dados obtidos em outras pesquisas.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões gerais do trabalho.

No Capítulo 7 são sugeridas algumas linhas de pesquisa para o prosseguimento do estudo envolvendo agregados reciclados de concreto.

No Capítulo 8 encontra-se a bibliografia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa.

AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 Capítulo

2.1. RECICLAGEM DE CONCRETO

2.1.1. GERAÇÃO

Atualmente, a geração de resíduos pela indústria da construção civil é um dos grandes problemas enfrentados pela sociedade. Em muitos países, existem regulamentações que tratam da disposição e o gerenciamento desses rejeitos com a aplicação de elevadas taxas sobre os resíduos que são depositados no meio-ambiente.

Um estudo coordenado pelo DECC/USP (Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP) avaliou a questão do desperdício de materiais nos canteiros de obras, sendo que um dos itens desse estudo foi a análise da perda média de concreto dosado em central para a execução de superestruturas. Os resultados mostraram que entre as obras analisadas, o índice médio de perdas para o concreto foi igual a 9%. DA SILVA et al. (1998) pesquisaram os índices de perda de concreto

usinado, encontrados em um canteiro na cidade de São Carlos - SP, para o serviço de concretagem de estruturas. A pesquisa intitulada – “Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras”, de âmbito nacional e financiamento da FINEP, contou com a participação de 16 Universidades e teve como objetivo estabelecer índices confiáveis sobre perdas de 18 diferentes materiais, entre eles, o concreto usinado. Segundo o autor, a perda de concreto usinado no canteiro estudado foi de 5%, estando abaixo da média nacional de 9%.

Com relação ao desperdício nas usinas de concreto pré-misturado, OKAWA et al. (2000) citam que as usinas de concreto pré-misturado no Japão produzem cerca de 180 milhões de m³ de concreto anualmente e perdem cerca de 1% a 2% desse volume. Segundo REZENDE et al. (1996), o setor de usinas de concreto pré-misturado alemão estima que são desperdiçados de 1% a 4% de toda a produção de concreto daquele país. Esse desperdício deve-se ao retorno de sobras de concreto nos caminhões betoneira, bombas de concreto ou pela lavagem dos caminhões e instalações da central.

Algumas estimativas fornecidas pela ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem, para a região metropolitana de São Paulo apontam para um volume de cerca de 3500m³ a 7000m³ de concreto residual gerados mensalmente nas centrais dosadoras.

Para os resíduos de concreto provenientes de pavimentos rodoviários, tem-se que aproximadamente 320km de pavimentos de concreto são reciclados anualmente nos Estados Unidos e, cerca de 3750 toneladas de concreto podem ser recuperadas para cada quilômetro de pavimento reciclado, totalizando cerca de 1,2 milhões de toneladas de pavimentos de concreto reciclados anualmente.

Segundo OLSEN (2001) existem cerca de quarenta grandes estruturas “offshore” em todo o mundo e muitas outras pequenas. Grande parte delas

está situada no Mar do Norte, em profundidades que chegam à 350m e volumes de concreto de até 240000m³. Segundo o autor, apesar da vida útil dessas estruturas ser de 200 anos, as reservas de hidrocarbonos podem cessar antes deste prazo. Nesse caso, o que se deve fazer com essas estruturas? Para resolver essa questão, a convenção de OSPAR realizada em Sintra, Portugal decidiu que todas as plataformas offshore devem ser removidas após esgotarem-se as reservas gerando, como consequência, uma enorme quantidade de resíduos de concreto que apresentam enorme potencial para serem reciclados.

A geração de resíduos pode ser devida a catástrofes naturais como movimentações da crosta terrestre. LAURITZEN (1999) cita os desastres naturais (terremoto, furacão) como responsáveis pela geração de grande quantidade de resíduos de construção e outros tipos de resíduos, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Alguns exemplos de desastres naturais que geraram grande quantidade de resíduos:

- Terremoto ocorrido em Kobe, Japão (17/01/1995) gerou cerca de oito milhões de m³ (11 milhões de toneladas) de resíduos de construção;
- Terremoto ocorrido na Turquia (13/03/1992) resultou na destruição de cerca de 6500 habitações. Os resíduos provenientes da demolição foram estimados em cerca de 1 milhão de toneladas;
- Terremoto Northridge ocorrido em Los Angeles (17/01/1994) gerou cerca de 2 milhões de toneladas de resíduos. Um ano após esse terremoto, ocorreu o grande Hanshin-Awaji (17/01/1995) causando a destruição de mais de 100000 edificações bem como a infra-estrutura existente: ferrovias, rodovias e portos. Estima-se que nesse terremoto foram gerados cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos;

Segundo VAN ACKER (1996), a quantidade anual de resíduos sólidos de material de construção gerado na União Européia está em torno de 170 milhões de toneladas. Sendo que esse resíduo pode ser dividido nas seguintes parcelas: concreto - 41%, alvenaria - 40%, asfalto - 12%, cerâmica e azulejos - 7%. Analisando esses dados, é notada uma grande influência dos resíduos de concreto no volume total de material, 68 milhões de toneladas/ano, o que representa uma quantidade considerável. Na Alemanha, segundo KILBERT & CHINI (2000) o volume de resíduos produzidos é de cerca de 45 milhões de toneladas, sendo que cerca de 25% do volume total é composto de resíduos de concreto.

Segundo NOGUCHI & TAMURA (2001), a reciclagem de resíduos de construção no Japão chega a 57% do volume total produzido; sendo que aproximadamente 73% desse volume são representados pelo concreto proveniente de demolição de estruturas e pavimentos de concreto. AJDUKIEWICZ & KLISZCZEWICZ (2002) citam que no Leste Europeu está ocorrendo um programa intensivo de modernização e reconstrução de rodovias e pontes desde o início da década de 90. Devido a isso, está sendo gerada uma grande quantidade de resíduos provenientes de estruturas de concreto armado e pretendido os quais, depois de reciclados, apresentarão um grande potencial para serem reutilizados como agregados.

2.1.2. DISPOSIÇÃO

Os resíduos de concreto produzidos são geralmente depositados indiscriminadamente em vales, margens de rios, a céu aberto ou em aterros desprovidos de qualquer tratamento específico.

Somam-se a isto, os problemas gerados à própria população e ao meio-ambiente através da contaminação das águas superficiais, surgimento de zoonoses e a poluição visual. Resultados obtidos por OLIVEIRA & ASSIS (2001) mostram que os resíduos de concreto não são inertes, fato este que

implica na necessidade da revisão da NBR 10004. Quando submetidos à ação de chuva ácida, os resíduos de concreto liberam íons que podem alterar as condições naturais da água pela sua mineralização e da mesma forma o solo, provocando danos ao meio-ambiente e riscos à saúde pública.

Em alguns países, existem regulamentações que proíbem e punem os responsáveis pela deposição de resíduos no meio-ambiente. No Reino Unido, a cobrança de taxas pela deposição de resíduos de concreto no meio-ambiente, tem incentivado as usinas de concreto pré-misturado a reduzir substancialmente a quantidade de resíduo produzido (SEALEY et al., 2001). Na Inglaterra, o Estado cobra uma taxa da construtora de todo o resíduo gerado na obra; a preocupação, em princípio, não é apenas com o desperdício em si, mas sim com o provável impacto que esse resíduo gerará no meio-ambiente; caso esse resíduo seja previamente separado na obra, a taxa a ser cobrada será menor.

Em 1978, foi publicada pelo governo holandês uma regulamentação com relação aos resíduos de construção, tendo como finalidade reduzir a poluição do meio-ambiente através da diminuição do volume desses resíduos e quando isto não for possível promover a reciclagem. Outra forma encontrada pelo governo para coibir o desperdício e promover a reciclagem dos materiais foi aumentar em cerca de cinco vezes as taxas para despejo desses materiais no meio ambiente. Nesse país cerca de 80% dos resíduos são reciclados devido à existência de regulamentações rígidas (DE VRIES, 1993 e KILBERT & CHINI, 2000).

Na Noruega, existem algumas regulamentações que datam de 1981 e prevêm que os geradores de resíduos devem pagar os custos de reabilitação do meio-ambiente. Além disso, foi instituída, em 1999, uma taxa por tonelada de resíduos depositados na natureza, afirmam KILBERT & CHINI (2000). Segundo TOALDO (1993), os construtores no Japão são obrigados a incluir em seus projetos a destinação final do resíduo gerado pelas suas obras. Além disso, o cidadão é impedido de jogar os resíduos em

terrenos baldios ou córregos sob a pena de ser autuado, pagando pesadas multas pela infração.

Com relação à política de reciclagem no Brasil, as esperanças renascem com o lançamento em 1999, pelo governo federal do Programa Brasileiro de Reciclagem (PBR), da resolução publicada pelo CONAMA que entrou em vigor no início de 2003 dispendo sobre a gestão dos resíduos da construção civil e do livro publicado em 2001, financiado pela Caixa Econômica Federal denominado “Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção” produzido pelo Projeto Entulho Bom e premiado pela ONU – Organização das Nações Unidas, como “uma das 100 melhores práticas para melhorar a qualidade de vida”. Com a criação do Programa Brasileiro de Reciclagem pelo governo Federal em 1999, espera-se que se reduzam as cargas tributárias dos reciclados e iniciem-se linhas de crédito específicas; alguns levantamentos preliminares estimam que a expansão da reciclagem poderá criar mais de 300 mil novos empregos, atingindo uma média de um milhão de profissionais envolvidos (SCHARF, 1999).

2.1.3. PROCESSOS UTILIZADOS PARA RECUPERAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONCRETO

Com relação aos resíduos de concreto, existem inúmeros processos que podem ser aplicados na sua reciclagem. Nas usinas de concreto pré-misturado e fábricas de elementos pré-moldados têm-se basicamente dois tipos de resíduos: rejeitos de concreto no estado fresco e rejeitos de concreto no estado endurecido.

Para a reciclagem do concreto fresco, um dos métodos existentes consiste na separação dos agregados da água de lavagem (partículas de cimento + finos em suspensão). No sistema mecânico de separação, o processo de reciclagem é extremamente simples. Os resíduos de concreto fresco são depositados num funil alimentador, que conduz essas sobras

para a primeira seção do equipamento, onde é introduzida água permanentemente auxiliando a decantação dos agregados, de modo que o aglomerante existente (cimento) permaneça em suspensão. Essa água é recolhida quando transborda pelo mesmo ponto de alimentação por onde são introduzidas as sobras de concreto, já os agregados são recolhidos na calha de descarga (REZENDE et al., 1996).

Na Figura 2.1, encontra-se o equipamento utilizado para reciclagem do concreto fresco.

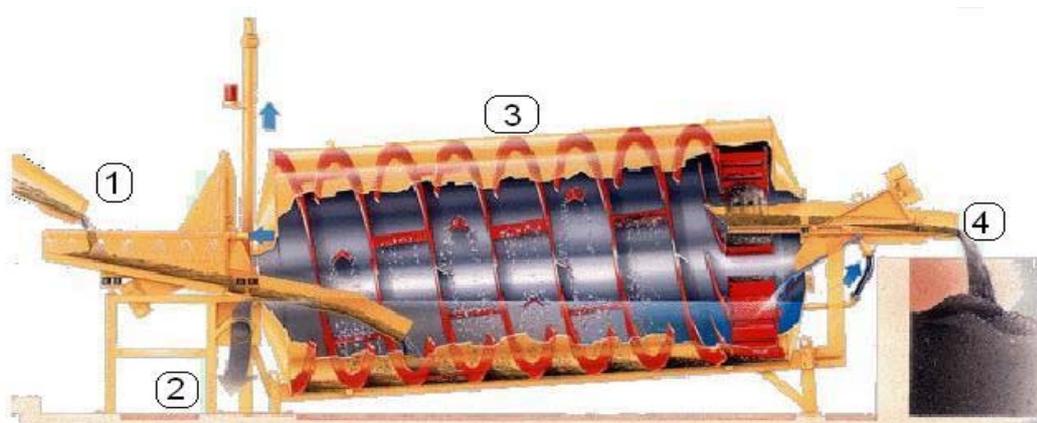


Figura 2.1 – Equipamento utilizado para a reciclagem do concreto fresco
(FONTE: SCHWING STETTER, 2000)

Na Figura 2.1, os números identificam os seguintes processos:

- 1 – Resíduos de concreto fresco sendo depositados no funil alimentador.
- 2 – Saída da água de lavagem com os finos em suspensão, os quais são direcionados para um tanque que possui agitadores para evitar a decantação. Após isso, pode-se propiciar o bombeamento desses materiais para o sistema de dosagem de novos concretos.
- 3 – Processo de lavagem sendo executado no tambor, que possui espirais que giram no sentido contrário ao fluxo de água.
- 4 – Saída dos agregados na calha de descarga.

O concreto residual sendo entregue à planta de reciclagem, o tanque utilizado para evitar a decantação do material e a saída de agregados na calha de descarga encontram-se, respectivamente, nas Figuras 2.2, 2.3 e 2.4.



Figura 2.2 – Concreto residual sendo entregue à planta de reciclagem

(FONTE: SCHWING STETTER, 2000)

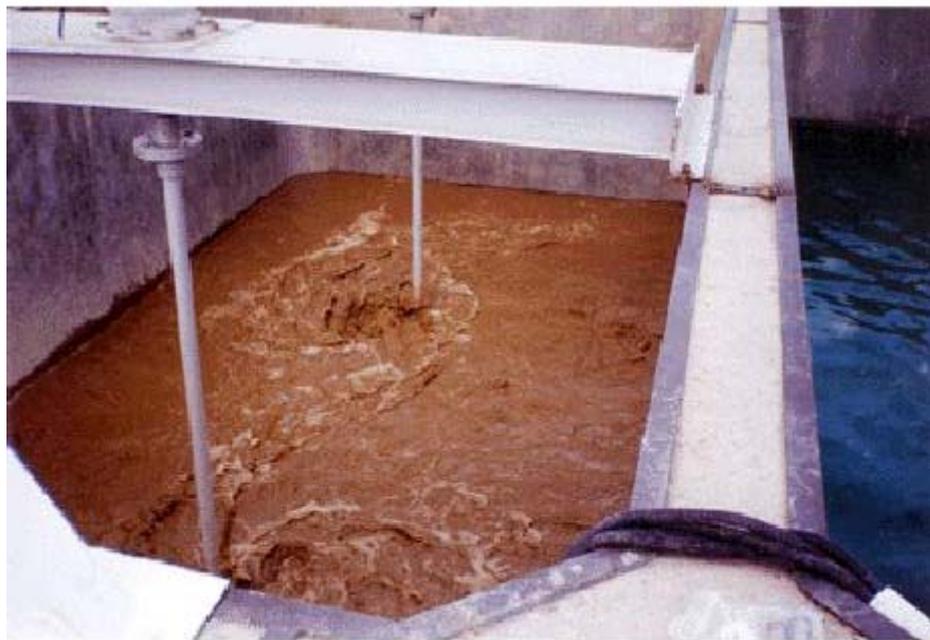


Figura 2.3 – Tanque com agitadores
(FONTE: SCHWING STETTER, 2000)



Figura 2.4 – Saída dos agregados na calha de descarga
(FONTE: SCHWING STETTER, 2000)

Justifica-se a utilização do equipamento para reciclagem do concreto fresco pelas vantagens técnico-econômicas do reaproveitamento dos agregados no processo de lavagem, pela eliminação dos custos de deposição de resíduos sólidos e os benefícios ambientais provenientes da reciclagem.

A água de lavagem com o cimento em suspensão poderá ser reutilizados para a mistura de novos concretos, desde que o cimento presente não seja considerado como aglomerante, mas simplesmente como material fino e inerte. SANDROLINI & FRANZONI (2001) reutilizaram a água de lavagem com o cimento em suspensão e, os resultados mostraram que as argamassas e concretos alcançaram cerca de 96% da resistência do concreto de referência e, em alguns casos foi até superior. Além disso, o uso da água reciclada conduziu a uma redução da absorção de água e diminuição da micro-porosidade da argamassa, melhorando a durabilidade do material; esse efeito pode ser atribuído ao preenchimento pelos finos presentes na água reciclada e pela ligeira redução da relação água/cimento.

Para o tratamento do concreto fresco residual, também são utilizadas as caixas de sedimentação. Trata-se do sistema de tratamento mais utilizado devido ao pequeno investimento inicial, consistindo de uma caixa de sedimentação de fundo inclinado no qual são lançados o concreto residual e os resíduos da lavagem dos caminhões e do pátio central. As centrais de concreto brasileiras utilizam, na sua maioria, os sistemas de caixas de decantação, para posterior deposição dos resíduos por terceiros ou retirados na própria central dosadora e utilizados em aterros, bases de pavimentação, etc. Para o reaproveitamento da água de lavagem é necessária a construção de duas a quatro caixas, em série, para a decantação do cimento e partículas finas em suspensão na água.

Um novo método está sendo proposto nos Estados Unidos e Europa visando à reutilização do concreto fresco desperdiçado. Segundo OKAWA et al. (2000) e KHURANA & PAOLINI (1998), esse método baseia-se na adição

de um estabilizador (agente ultraretardador) com a finalidade de interromper a hidratação do cimento e, depois de um determinado tempo, é adicionado um ativador (agente acelerador) possibilitando a reutilização desse concreto. A técnica utilizada é manter o concreto no seu estado fresco por longos períodos, tornando possível a estocagem desse material para uso posterior sem prejuízo de suas propriedades físicas e mecânicas. O primeiro componente desse sistema é um estabilizador composto por ácido carboxílico e fósforo contendo ácido orgânico e sais; o seu mecanismo é totalmente diferente dos retardadores convencionais, pois inibe a nucleação do CSH e CH, interrompendo todas as fases de hidratação do cimento incluindo a fração C_3A . Dependendo da dosagem, a mistura pode ser mantida nesse estado de desativação por horas ou dias (máximo de três dias). O segundo componente do sistema é um ativador que quando adicionado permite a continuação do processo de hidratação, esse ativador pode ser definido como um acelerador da hidratação.

Os resíduos de concreto no estado endurecido e que podem ser originários de diversas fontes, geralmente são reciclados visando a sua reutilização como agregados em novas misturas ou para confecção de sub-bases e bases de rodovias. Devido a algumas propriedades deletérias dos materiais reciclados, alguns pesquisadores propõem métodos alternativos para a reciclagem do concreto visando melhorar as propriedades desse material.

Dentre alguns desses métodos destaca-se o proposto por RASHWAN & ABOURISK (1997). O processo para recuperação do concreto desperdiçado foi investigado conjuntamente com uma usina de concreto pré-misturado, o fundamento do método baseia-se na passagem do concreto no estado plástico para o estado endurecido por um curto período de tempo, depois do qual o concreto poderia ser reciclado para ser utilizado como agregado em novas misturas. Esse processo apresenta algumas vantagens:

- Nesse processo, a quantidade de resíduos a serem reciclados é pequena, uma vez que a britagem é feita logo após o concreto ser desperdiçado. Com isso, o processo de reciclagem do concreto pode ser feito com a utilização de pequenos britadores móveis, eliminando os custos de transporte;
- O material reciclado é produzido sob condições controladas. Isso inclui o conhecimento do nível de maturidade do concreto original que será reciclado;
- Espera-se que as partículas de cimento não-hidratadas, presentes nos agregados reciclados, contribuam para aumentar a quantidade de cimento nos concretos reciclados.

No Japão, segundo TOMOSAWA & NOGUCHI (1996) está surgindo o conceito de concreto totalmente reciclável que consiste na reutilização de todos os componentes do concreto, num procedimento semelhante ao que acontece com o aço e o alumínio; o concreto totalmente reciclável é um concreto, cujo aglomerante, aditivos e agregados seriam todos elaborados a partir de resíduos de concreto.

Dentro desse contexto, um método para recuperação do concreto foi proposto por NOGUCHI & TAMURA (2001) que desenvolveram um estudo visando o reaproveitamento dos resíduos de concreto gerados pela demolição de uma usina nuclear. Nesse estudo empregaram uma tecnologia visando produzir agregados reciclados com qualidade semelhante ao agregado natural. Trata-se de dois processos que podem ser empregados para obtenção de agregados reciclados de excelente qualidade. O primeiro deles é chamado de abrasão mecânica, na qual o concreto é reciclado utilizando-se um moinho vertical tubular excêntrico com a finalidade de produzir agregados graúdos sem a pasta de cimento aderida ao agregado. O segundo processo é utilizado tanto para a produção de agregados graúdos reciclados como para miúdos; nesse processo, o concreto deve ser previamente britado em pedaços de até 50mm e, então, é colocado num

forno de aquecimento vertical, esse forno produzirá uma corrente de ar quente que provocará o enfraquecimento da pasta de cimento aderida ao agregado. Após isso, o agregado é colocado num moinho tubular aonde será feita a separação da pasta de cimento do agregado.

De maneira geral segundo os mesmos pesquisadores, os agregados produzidos utilizando tais processos apresentaram qualidade comparável aos agregados naturais; para o agregado graúdo reciclado, índices de absorção inferiores a 2% e para o agregado miúdo, absorção inferior a 3%. Além desses processos existem alguns métodos para modificar a superfície do agregado natural visando reduzir a adesão entre o agregado e a matriz sem prejudicar as propriedades mecânicas do concreto. Com a utilização desses tratamentos, pode-se recuperar mais facilmente e em maior quantidade o agregado natural do concreto reciclado. Resumidamente são dois tipos básicos de métodos de tratamento:

- Tratamento químico: O principal agente é um óleo mineral. Esse agente hidroliza-se nas condições alcalinas do concreto fresco formando uma espécie de revestimento na superfície do agregado, tal revestimento acarreta um decréscimo da quantidade de cimento hidratado na interface pasta-agregado e também conduz a uma diminuição da adesão entre agregado e pasta, permitindo a fácil recuperação do agregado original.
- Tratamento físico: O agente atuante é uma emulsão de resina sintética solúvel em água que permanece estável quimicamente no concreto fresco. Com a utilização desse agente, a superfície áspera do agregado torna-se praticamente lisa diminuindo a adesão entre agregado e a matriz da pasta.

Os resultados obtidos indicaram que a utilização de tratamento químico permite uma recuperação de até 80% do agregado natural após a reciclagem do concreto, caso seja feito o tratamento físico esse índice é de cerca de 70% e para amostras que não sofreram nenhum tipo de tratamento

esse índice é aproximadamente 50%. Além disso, o tratamento da superfície possibilita a recuperação de agregados de excelente qualidade com pequena quantidade de argamassa aderida ao agregado.

2.1.4. BRITAGEM DO CONCRETO

A correta escolha do britador a ser utilizado otimizará os resultados e proporcionará agregados com a granulometria e forma de partículas desejadas. Dependendo do campo de aplicação do material reciclado haverá sempre um britador apropriado para tal.

Segundo HANSEN (1985), a utilização do britador de mandíbula fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para a produção de concreto. O britador de cones é adequado para ser utilizado como um britador secundário, já o britador de impacto fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para ser empregado em sub-bases e bases de rodovias e são menos suscetíveis a materiais que não podem ser britados como barras de aço presente nas estruturas de concreto armado, entretanto, seu custo de manutenção é maior e os agregados graúdos reciclados são de qualidade inferior se comparados com os agregados produzidos pelo britador de mandíbula.

Com relação aos equipamentos mais adequados para britagem, COELHO (2001) cita que algumas plantas em operação em Copenhague, Dinamarca, utilizam britadores giratórios e cônicos, trabalhando como secundários, em conjunto com britadores de mandíbula primários. Para instalações mais simples, utiliza-se apenas um britador de impacto e nenhum secundário. Alguns equipamentos são demonstrados nas Figuras 2.5 a 2.10.

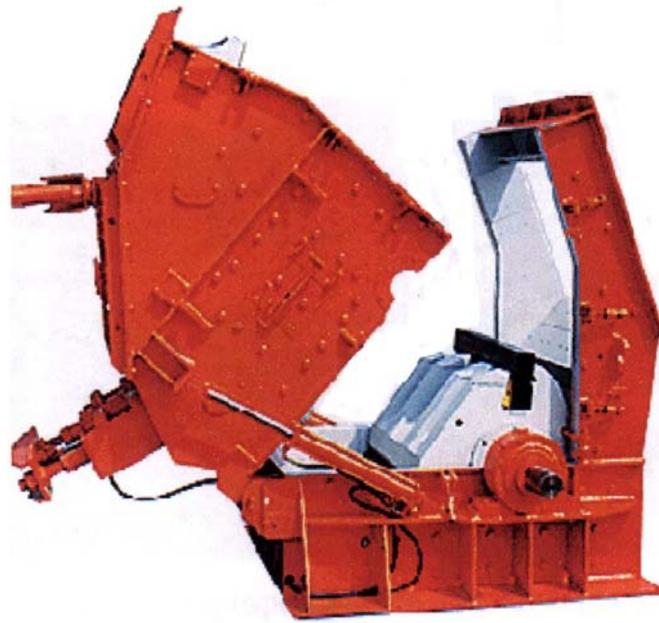


Figura 2.5 – Britador portátil de baixa capacidade de produção
(FONTE: www.eaglecrusher.com)



Figura 2.6 – Britador portátil de média capacidade de produção
(FONTE: www.eaglecrusher.com)



Figura 2.7 – Britador autopropelido de alta capacidade de produção

(FONTE: www.eaglecrusher.com)



Figura 2.8 – Britador de cones

(FONTE: www.michagg.com)



Figura 2.9 – Britador de mandíbula

(FONTE: www.michagg.com)



Figura 2.10 – Britador de mandíbula com alta capacidade de produção

(FONTE: www.michagg.com)

Segundo BALLISTA (2003) há quatro maneiras básicas para redução do tamanho das partículas: por impacto, atrito, clivagem (ou punção) ou compressão. A britagem pode ser realizada em circuitos abertos ou fechados; no circuito fechado, os materiais passam pelo britador até atingirem o tamanho máximo desejado e no circuito aberto, o material passa pelo britador uma única vez, Figura 2.11.

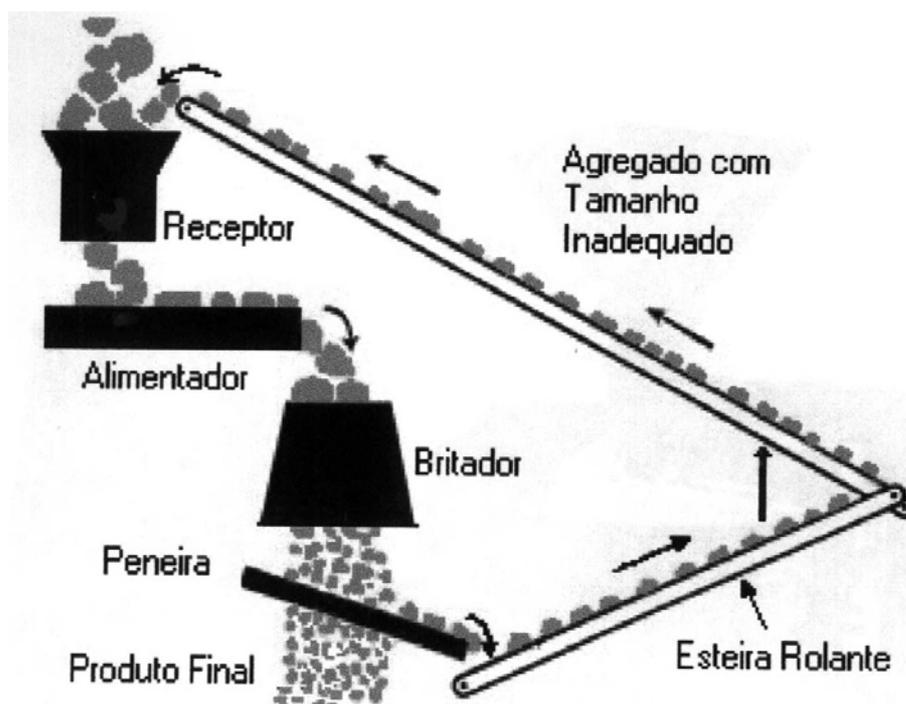


Figura 2.11 – Circuito fechado de britagem

(FONTE: BALLISTA, 2003)

Segundo CAIRNS (1998), o processamento dos resíduos pode ser feito em plantas fixas ou móveis. As plantas móveis consistem de um britador e um separador magnético, não permitindo a introdução de outros acessórios. O material reciclado não poderá ser separado em diferentes granulometrias devido à inexistência de peneiradores, dificultando dessa forma o uso do material para a produção de novas misturas. Algumas das vantagens dessas plantas móveis são descritas abaixo:

- Menor custo (cerca de cinco por cento se comparado com as plantas fixas).
- Menor tempo de instalação.
- Redução dos custos de transporte.

Por outro lado, as principais vantagens das plantas fixas são:

- Possibilidade de obter produtos reciclados diversificados e com qualidade superior aos obtidos por plantas móveis.
- Utilização de equipamentos maiores e mais potentes que fornecerão um tratamento qualitativo superior no processamento dos resíduos quando comparado com as plantas móveis.

As desvantagens das plantas fixas referem-se aos altos investimentos e a grande área necessária para sua alocação (50.000m²). Nas Figuras 2.12, 2.13 e 2.14, podem ser visualizadas as plantas móveis e fixas para a produção de agregados reciclados.



Figura 2.12 – Planta móvel para a produção de reciclados

FONTE: (FRASER, 2003)

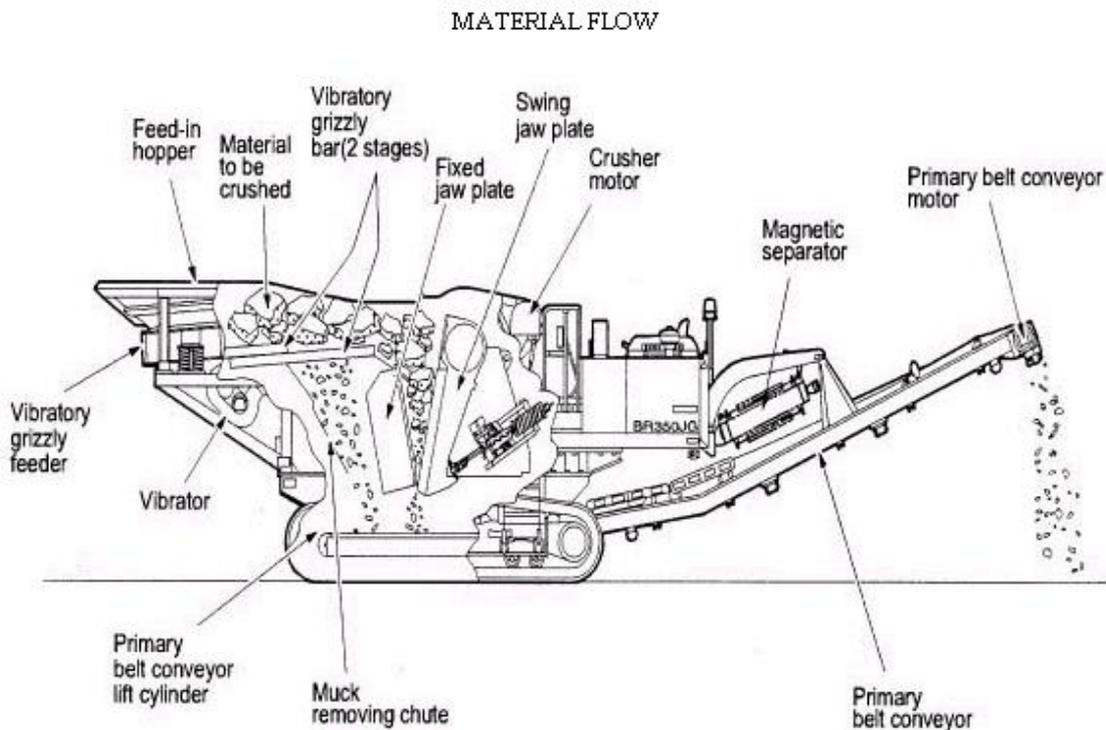


Figura 2.13 – Esquema de funcionamento da planta móvel

FONTE: (NETT21, 2003)



Figura 2.14 – Planta fixa para a produção de agregados reciclados

FONTE: (CAIRNS et al., 1998)

2.1.5. APLICABILIDADE

Objetivando buscar novas fontes para a substituição dos materiais naturais, os resíduos de concreto apresentam elevado potencial para reciclagem e aplicação na construção civil. Dentre os vários resíduos da construção civil, os resíduos de concreto possuem um dos maiores potenciais de utilização, devido ao conhecimento de suas propriedades básicas e, principalmente, ao seu menor grau de contaminação por outros materiais quando comparado com outros resíduos.

O reaproveitamento dos resíduos é fundamental visando à preservação das reservas de matérias primas, além das vantagens de caráter econômico e ambiental. Em alguns países da Europa, a ausência de material primário, implica até na importação de resíduos de outros países para geração de agregado. Além disso, as restrições ambientais encarecem ou inibem os processos extrativos minerais, bem como a deposição final dos resíduos gerados por construções e reformas viárias. Na América do Norte, apesar da disponibilidade de agregado primário, as distâncias de transporte são significativas, aliadas à escassez de áreas apropriadas para deposição ou o seu alto valor (COELHO, 2000).

Segundo o mesmo pesquisador, a situação no Brasil também é preocupante como, por exemplo, em São Paulo, aonde os recursos naturais passam a provir de distâncias cada vez maiores devido ao crescimento da mancha urbana que atingiu fontes de materiais naturais. Além disso, existe uma lei que impede a abertura de novas pedreiras nos maciços rochosos metropolitanos, como consequência, as empresas que extraem material granular para construção se tornam cada vez mais escassas em São Paulo e provêm de distâncias cada vez maiores, encarecendo o bem mineral e o custo final para o consumidor. Segundo VALVERDE (2000), o transporte responde por cerca de 2/3 do preço final do agregado, o que impõe a necessidade de produzi-los o mais próximo possível do mercado, que são os aglomerados urbanos.

As pesquisas envolvendo agregados reciclados são unânimes em afirmar a grande aplicabilidade do material, especialmente, o agregado graúdo reciclado, em aplicações não-estruturais e estruturais. Um dos entraves para a utilização dos agregados reciclados se refere à existência de poucas regulamentações normativas tratando do material.

As vantagens econômicas da reciclagem dos resíduos de construção podem ser exemplificadas através das atividades de pesquisa que são desenvolvidas principalmente por Universidades situadas na Holanda, como a Delft University of Technology e a Rutgers University, e Institutos de pesquisa como o TNO. Tais pesquisas converteram-se em negócio lucrativo para significativo número de empresas privadas que executam atividades de pesquisa e desenvolvimento (JOHN, 2000). A reciclagem também permite a geração de empregos e aumenta a competitividade da economia. Deve-se enfatizar que a reciclagem permite gerar valor a partir de um produto que antes se constituía em despesas.

2.1.6. ALGUNS CASOS PRÁTICOS SOBRE A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

Nos artigos consultados foram encontradas muitas experiências práticas envolvendo agregados reciclados de concreto. Evidencia-se que o aumento do conhecimento da tecnologia de emprego do material acrescentará novas perspectivas para sua utilização.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), o “Michigan State Department of Transportation”, executou a maior reciclagem de pavimento de concreto. Em 1983, a rodovia “Interstate 94”, uma das mais antigas e de maior tráfego do estado de Michigan, tornou-se a primeira grande freeway dos EUA a reciclar concreto. Um trecho deteriorado de 9km de extensão de pavimento de concreto foi britado, e então o concreto fragmentado foi usado como agregado na construção do novo pavimento.

VAN ACKER (1996), cita uma companhia situada em Lier/Bélgica, especializada na produção de elementos estruturais pré-moldados (Partek Ergon), que está reciclando o concreto desperdiçado na sua linha de produção. O concreto desperdiçado é empilhado ou estocado em uma grande área, e uma vez por ano, ou a cada dois anos, um britador processa esse concreto desperdiçado. Em 1995, o volume de resíduos de concreto ficou em torno de 7423 toneladas. GRÚBL & NEALEN (1998) utilizaram agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto para produção de concreto pré-misturado; esse concreto foi empregado na construção de um bloco de escritórios em Darmstadt, Alemanha, aonde foram utilizados cerca de 480m³ de concreto com agregados reciclados.

TERANISHI et al. (1998) estabeleceu um sistema de reciclagem para resíduos de concreto proveniente da demolição de centrais elétricas. DOLARA et al. (1998) estudaram a aplicação de concretos com agregados reciclados para finalidades estruturais, nessa pesquisa foram confeccionadas três vigas protendidas de 15m de vão utilizando concreto com agregados reciclados.

NOGUCHI & TAMURA (2001) desenvolveram um estudo visando o reaproveitamento do resíduo de concreto gerado pela demolição de uma usina nuclear; nesse estudo empregaram uma tecnologia inovadora visando produzir agregados reciclados com qualidade semelhante ao agregado natural. KREZEL & McMANUS (2002) confeccionaram barreiras acústicas com concreto reciclado que apresentaram excelente desempenho acústico para aplicações em rodovias. Num trecho de cerca de três quilômetros de barreira acústica com altura média de 2,5m foram utilizados aproximadamente 1000t de agregados graúdos reciclados.

2.2. CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

2.2.1. A ESTRUTURA DO CONCRETO

Analisando a macroestrutura do concreto com agregados naturais pode-se identificar dois constituintes principais: a pasta de cimento endurecida e partículas de agregado. Entretanto, a nível microscópico pode-se distinguir outra fase que está em contato com o agregado graúdo; trata-se da zona de transição que apresenta características distintas do restante da pasta e que geralmente é mais fraca do que as duas outras fases e, conseqüentemente, exerce uma influência muito maior nas propriedades do material, Figura 2.15.

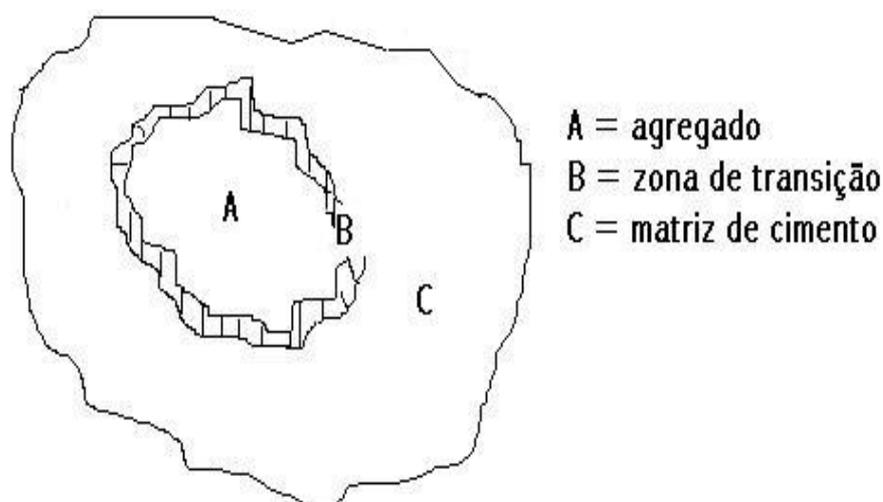


Figura 2.15 - Microestrutura do concreto

Com relação à microestrutura do concreto com agregado graúdo reciclado, nota-se que as propriedades do material são influenciadas principalmente pelas características da argamassa aderida ao agregado reciclado e pela nova matriz de cimento em contato com o reciclado, Figura 2.16.

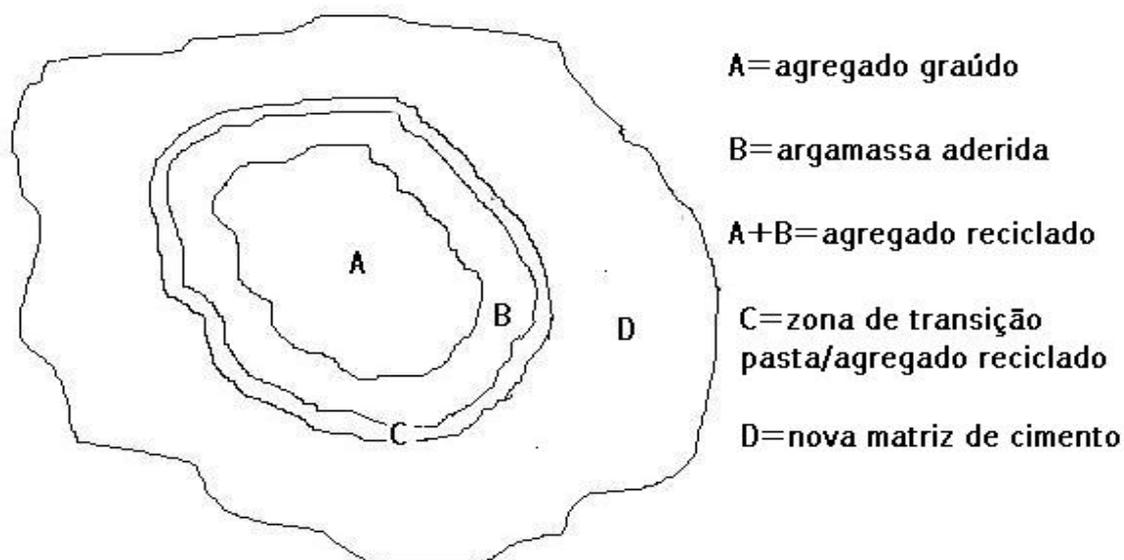


Figura 2.16 - Microestrutura do concreto reciclado

2.2.1.1. AGREGADO

A fase agregado é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. A massa específica do agregado graúdo influi diretamente na massa específica do concreto, sendo também diretamente proporcional à resistência do concreto, isto é, quando maior a porosidade (índice de vazios) do agregado, menor será sua resistência tornando-se o elo fraco da mistura.

Segundo KAEFER as características do agregado, como granulometria e textura, também influem, embora de maneira menos significativa nas propriedades do concreto. Para agregados com grande diâmetro característico ou de forma lamelar ocorre a formação de um filme de água junto às paredes do agregado (exsudação interna), enfraquecendo sua ligação com a pasta; por outro lado, agregados de diâmetros menores aumentam a superfície de contato entre o agregado e a pasta de cimento elevando a resistência do concreto. Para concretos de massa específica normal (2400 a 2500kg/m^3) com resistência de até 50MPa aos 28 dias, o

agregado pouco influi na resistência final sendo mais resistente que os demais componentes da mistura.

No caso de agregados graúdos reciclados, a qualidade do resíduo de concreto é fundamental na determinação das propriedades mecânicas do novo concreto. A argamassa aderida ao reciclado pode representar o elo mais fraco da mistura, quando sua resistência for menor que a resistência da nova zona de transição; especialmente devido à sua maior porosidade.

2.2.1.2. MATRIZ (PASTA DE CIMENTO)

A matriz é formada pela zona de transição entre agregado e pasta e a pasta de cimento propriamente dita. É constituída por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento; os mais importantes são os silicatos hidratados (C-S-H) que podem parecer como estruturas fibrosas, carbonato de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que cristaliza em grandes placas hexagonais superpostas e a etringita, que cristaliza no início da pega na forma de agulhas.

A zona de transição apresenta características diferentes do restante da pasta, sendo caracterizada pela sua maior porosidade e heterogeneidade. Esta porosidade é decorrente da elevação da relação água/cimento em decorrência do filme de água se formar em torno do agregado graúdo; verifica-se, também, falha na aderência entre pasta e agregado relacionada à formação de grandes cristais que apresentam superfície específica menor, fato este que diminui a força de adesão (Forças de Van der Waals). Todas essas características contribuem para que a zona de transição seja considerada o elo fraco do conjunto, estando sujeita a micro-fissuração devida a pequenos acréscimos de carga, variações de volume e umidade.

Segundo SILVA (2000), os principais tipos de ligações presentes numa pasta de cimento-agregado são enumerados a seguir:

- Ligação mecânica: por rugosidade superficial do agregado em que os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas da superfície dos materiais aglomerados.
- Aderência devido à absorção, pelo agregado, da água contendo parte do aglomerante dissolvido; o qual, após penetrar na superfície da partícula, cristaliza-se no mesmo tempo que a pasta, ligando-se a ela.
- Atração entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, por força de Van der Waals – ligação puramente física.
- Continuidade da estrutura cristalina do inerte nos produtos da hidratação do cimento. Uma espécie de ligação, na qual os cristais dos componentes do cimento hidratado prolongam os do agregado, tendo em comum entre si as suas redes cristalinas.
- Aderência química entre os produtos de reação da hidratação do cimento e as superfícies do agregado.

No caso de concretos reciclados, a zona de transição pode representar o elo fraco do conjunto desde que sua resistência seja menor que a resistência da argamassa aderida ao agregado reciclado. Para resíduos de concreto que foram reciclados logo após sua geração, isto é, que possuem uma grande quantidade de cimento não-hidratado presente na sua superfície, a resistência do conjunto será determinada pelas características da argamassa aderida ao agregado. Neste caso, haverá mais partículas de cimento para se hidratarem na nova zona de transição e capazes de se dispor densamente junto das partículas grandes do agregado; como consequência, a zona de transição terá um menor índice de vazios e influenciará de maneira menos significativa a resistência. Pode-se citar também o efeito “filler” provocado por estas partículas não-hidratadas que produz um maior empacotamento e preenchimento dos vazios da matriz e na interface, ocasionando um efeito parede que proporciona uma maior

compacidade localizada; gerando uma ligação mais eficiente entre pasta e o agregado.

2.2.2. PROCEDIMENTOS PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO

Para a produção de concretos reciclados, os procedimentos adotados na mistura acabam sendo decisivos na determinação das propriedades físicas e mecânicas do concreto. Há basicamente três métodos que são influenciados pela condição do agregado na mistura:

- Agregado reciclado na condição não-saturada (estado seco)
- Agregado reciclado na condição semi-saturada
- Agregado reciclado na condição saturada

Caso todos os componentes da mistura sejam colocados simultaneamente na betoneira, o agregado reciclado estará na condição não-saturada. Devido a isso, o agregado absorverá grande quantidade de água e partículas de cimento da mistura; o resultado será um aumento na densidade do agregado “densificação” e, conseqüentemente, enfraquecimento da zona de transição acarretando uma diminuição da resistência.

Nas dosagens, em que o agregado reciclado é previamente misturado com parte da água por um determinado tempo teremos uma condição semi-saturada. Nestas condições, a presença de água na superfície do agregado provocará uma retenção de grande quantidade de partículas de cimento ocasionando uma excelente aderência pasta/agregado. O agregado reciclado por não estar completamente saturado continuará absorvendo água da mistura fresca até atingir a condição saturada; quando no estado endurecido, a água que foi absorvida pelo agregado será mobilizada para a matriz de cimento acarretando um efeito conhecido como “cura interna”, que

melhorará as características da matriz hidratando as partículas remanescentes de cimento não-hidratado.

Para agregados que são previamente saturados antes da mistura, ocorrerá a mobilização de água na pasta fresca. A água absorvida pelo agregado pode ser considerada como sendo água livre e, portanto quando mobilizada na mistura fresca acarretará um aumento da relação água/cimento na zona de transição, fato este que aumentará o índice de vazios e redução da resistência.

2.2.3. PROPRIEDADES DO MATERIAL – PESQUISAS COM AGREGADOS RECICLADOS

As inúmeras pesquisas relacionadas ao estudo de agregados reciclados de concreto atestam o grande potencial do material. No Brasil, os estudos concentram-se basicamente no tratamento das sobras de concreto em centrais dosadoras, e ao reaproveitamento de resíduos de construção e demolição.

Dentre as principais diferenças apontadas na literatura entre agregados naturais e agregados reciclados de concreto, destacam-se, para os agregados reciclados, a menor massa específica, maior absorção de água e principalmente a quantidade de argamassa aderida à superfície dos agregados que influencia desde as propriedades do agregado, até as do concreto confeccionado com ele, seja no estado fresco ou endurecido.

FRONDISTOU-YANNAS (1977) em seu estudo substituiu os agregados grãos naturais por agregados grãos reciclados provenientes de uma laje de concreto com dois anos de idade, que após um processo de britagem e peneiramento apresentou um diâmetro máximo de 25,4mm. Com relação aos resultados obtidos, a pesquisadora pode estabelecer as seguintes conclusões:

- A resistência à compressão do concreto reciclado ficou de 4% a 14% inferior à do concreto natural (referência) com as mesmas características.
- O efeito mais significativo da utilização de agregado reciclado foi a redução do valor do módulo de elasticidade em cerca de 40% se comparado com o concreto de referência. Esse fato já era esperado, uma vez que o agregado reciclado apresenta módulo de elasticidade inferior ao módulo do agregado convencional, sendo que o módulo de elasticidade do concreto depende significativamente do módulo de elasticidade do agregado.

HANSEN (1985) realizou um estado da arte onde analisou várias propriedades dos agregados reciclados e dos concretos que incorporam esses agregados, algumas conclusões fundamentais podem ser enumeradas a seguir:

- Aproximadamente 30% de argamassa encontra-se aderida aos agregados graúdos reciclados que apresentam dimensão máxima característica situada entre 16 e 32mm. Para agregados graúdos com dimensão situada entre 8 e 16mm, esse valor é de 40% e para agregados com dimensão entre 4 e 8mm chega-se ao índice de 60%.
- Devido à grande quantidade de argamassa aderida ao material reciclado, a massa específica do agregado de concreto reciclado é cerca de 5 a 10% menor que a massa específica do agregado original.
- A resistência à compressão e a resistência à tração na flexão do concreto de agregados reciclados podem ser iguais ou até superiores aos valores obtidos para o concreto original desde que se utilize uma relação água/cimento menor. De maneira geral, a resistência à compressão de concretos com agregados reciclados é cerca de 5 a 10% menor que a resistência dos concretos originais.

- A utilização de agregados graúdos e miúdos reciclados pode acarretar numa redução de 15% na resistência de aderência e uma diminuição de cerca de 30% na resistência última de flexão quando comparado com o concreto original.
- O módulo de deformação do concreto com agregados reciclados é menor que o módulo do concreto original, devido a grande quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado. Essa redução situa-se entre 15 e 40%, sendo que os menores valores foram encontrados quando se utilizou a fração miúda e a graúda reciclada.
- Devido à grande quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado, a retração por secagem do concreto com agregados reciclados apresentou-se sempre maior do que a do concreto original. Esse aumento situa-se entre 40 e 80%, sendo que os maiores valores foram encontrados quando se utilizou a fração miúda e a graúda reciclada.
- Nenhuma influência foi observada nas propriedades do concreto, quando esse concreto com agregados graúdos reciclados foi produzido utilizando-se agentes retardadores, plastificantes e incorporadores de ar na mistura.
- Os concretos com agregados reciclados apresentam maior probabilidade de corrosão nas armaduras devido à maior permeabilidade e à maior taxa de carbonatação quando comparado com os concretos com agregados naturais.

BOEGH & HANSEN (1985) definiram três dosagens com níveis de resistência diferentes (baixa, média e alta) adotando como variável a relação água/cimento. Os concretos produzidos com essas dosagens foram britados, dando origem a três tipos diferentes de agregados graúdos reciclados conforme a resistência do concreto original. A partir disso, foram definidas

três dosagens com níveis de resistência diferentes (baixa, média e alta) para cada agregado graúdo reciclado.

De posse dos resultados, os pesquisadores chegaram às seguintes conclusões:

- Redução de 15 a 30% no módulo de elasticidade com a utilização do concreto com agregados graúdos reciclados;
- Aumento de 40 a 60% da retração por secagem para o concreto reciclado em comparação com o concreto original;
- Para os concretos que foram confeccionados com agregados reciclados provenientes de concretos de alta resistência (relação $a/c=0,40$), os resultados de resistência à compressão foram superiores aos obtidos para os concretos de referência. Além disso, os valores de módulo de elasticidade para tais concretos foram superiores aos obtidos para outros concretos reciclados.
- Caso o agregado reciclado contenha grande quantidade de argamassa aderida, a retração por secagem do concreto confeccionado com esses agregados será várias vezes maior que o valor de retração para o concreto original e o módulo de elasticidade cerca de 50% menor. Dessa maneira, os autores alertam para o uso indiscriminado de concretos reciclados que contenham agregados com grande quantidade de argamassa aderida; na verdade, tais concretos devem ser evitados.

TOPÇU & GUNÇAN (1995) e TOPÇU (1997) estudaram algumas propriedades físicas e mecânicas do concreto com agregado graúdo reciclado. O agregado graúdo reciclado foi proveniente de um concreto com resistência aos 28 dias de 16MPa; o agregado graúdo natural foi substituído pelo agregado graúdo reciclado em porcentagens iguais a 0%, 30%, 50%, 70% e 100% e a relação água/cimento utilizada nas dosagens foi 0,60.

As principais conclusões chegadas pelos pesquisadores com relação ao emprego de concretos com agregados reciclados foram:

- A trabalhabilidade dos concretos com agregados graúdos reciclados são menores que a trabalhabilidade do concreto natural e, isso pode ser explicado pela alta absorção do agregado reciclado;
- O módulo de elasticidade do concreto reciclado é menor que do concreto natural; para substituição total do agregado natural pelo agregado graúdo reciclado, esse valor fica em torno de 80% do encontrado para um concreto natural;

BARRA & VAZQUEZ (1996) avaliaram a influência da umidade dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto. Segundo os autores, apesar de muitos pesquisadores recomendarem a saturação do agregado antes de proceder à produção do concreto, desconhece-se o efeito provocado por este procedimento na durabilidade do concreto.

Na pesquisa foram avaliadas três diferentes condições de umidade do agregado reciclado (seco, saturado e semi-saturado). O agregado na condição saturada foi obtido através da imersão em água por 24 horas eliminando qualquer excesso de água na sua superfície. O agregado na condição semi-saturada depois de permanecer imerso na água por 24 horas foi disposto ao ar durante 20 a 30 minutos.

As principais conclusões obtidas pelos pesquisadores foram:

- Um pequeno decréscimo na resistência dos concretos produzidos com agregados na condição seca e saturada foi observada quando comparada com a resistência de concretos confeccionados com agregados semi-saturados.
- Com relação à durabilidade do material, observou-se que os resultados desfavoráveis foram obtidos para concretos que

incorporaram agregados reciclados na condição seca e saturada. Para concretos que incorporaram agregados na condição semi-saturada, foram obtidos os resultados mais favoráveis devido à formação de uma zona de transição mais sólida e densa com reduzido índice de vazios.

TAVAKOLI & SOROUSHIAN (1996) pesquisaram resíduos de concreto provenientes da demolição de pavimentos rodoviários, fazendo total substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado nas dosagens de concreto utilizadas. Foram analisados dois tipos de agregados graúdos reciclados provenientes de dois pavimentos rodoviários com características distintas.

Segundo os mesmos pesquisadores foi realizada a mistura dos agregados graúdos reciclados em uma betoneira durante 30 minutos com a finalidade de remover, mesmo que parcialmente, a argamassa aderida aos agregados graúdos reciclados. As principais conclusões a que chegaram foram:

- A quantidade de argamassa aderida ao agregado conduz a uma redução da resistência à compressão do concreto com agregados reciclados, sendo também responsável pelo aumento da absorção de água e pela perda de massa por abrasão.
- Os efeitos da mistura dos agregados reciclados visando a remoção da argamassa aderida aos agregados dependem da relação agregado graúdo/miúdo do concreto com agregados naturais, a quantidade de cimento presente nesse concreto e a relação água/cimento do concreto com agregados reciclados.
- A resistência à tração e flexão do concreto com agregados reciclados pode ser maior ou menor do que a resistência do concreto com agregados naturais dependendo da relação água/cimento e do período de mistura seca dos agregados.

- As propriedades do agregado reciclado são muito influenciadas pelas características do concreto com agregados naturais que o originou.

RASHWAN & ABOURISK (1997) investigaram com uma usina de concreto pré-misturado, um método alternativo para recuperação do concreto desperdiçado. Esse método baseia-se na passagem do concreto no estado plástico para o estado endurecido por um curto período de tempo, depois do qual o concreto pode ser britado para ser utilizado como agregado em novas misturas. Segundo os autores, espera-se que as partículas de cimento não-hidratadas, presentes nos agregados, contribuam para a quantidade de cimento nos concretos reciclados. A hidratação do cimento é um processo dependente do tempo, por esse motivo haveria uma duração ótima depois da qual o concreto poderia ser reciclado e, nesse mesmo momento haveria a maior porcentagem de partículas de cimento não-hidratadas aderidas ao agregado reciclado.

A descrição da pesquisa empreendida pelos pesquisadores pode ser dividida em dois itens:

- a) Influência do tempo de cura do concreto original para a produção dos resíduos.

No dia seguinte à moldagem, os moldes eram removidos e os cilindros de concreto mantidos em uma câmara úmida. Nesse mesmo dia, 20% dos corpos-de-prova foram britados e o restante dos exemplares foram britados nas seguintes idades, 2, 3, 4 e 7 dias após a data de moldagem. Dessa maneira, foram obtidos resíduos de concreto com idades diferentes, ou seja, graus de hidratação variados.

- b) Influência do tempo de armazenagem dos agregados reciclados.

No dia seguinte a moldagem, todos os corpos-de-prova foram britados. No dia da britagem, 20% dos agregados reciclados foram analisados e o restante dos agregados permaneceram armazenados para

serem analisados nas seguintes idades, 2, 3, 6 e 7 dias após a data de moldagem.

Os resíduos de concreto foram peneirados e separados em duas frações, uma miúda e outra graúda, que foram utilizadas nas dosagens substituindo totalmente os agregados naturais. As principais conclusões a que chegaram foram:

- Com relação à análise granulométrica, observaram uma grande quantidade de finos à medida que se aumenta o período de cura antes da britagem.
- O período de estocagem e o grau de hidratação do agregado não influenciam na densidade do agregado e do concreto reciclado. Para o agregado natural foi observada a maior massa unitária no estado solto, devido à menor quantidade de vazios desse agregado se comparada com os agregados reciclados.
- Com relação à absorção dos agregados, observaram que quanto maior é o período de cura antes da britagem maior será o valor da absorção do agregado reciclado e isso pode ser atribuído à perda de umidade para o processo de hidratação do cimento e para a formação do gel. A Influência do tempo de armazenamento foi muita pequena sobre esta propriedade.
- Para os concretos confeccionados com agregados reciclados que foram britados 24h após a moldagem e que apresentavam baixo grau de hidratação, obtiveram-se resistências à compressão cerca de 25% superiores às obtidas para o concreto de referência. Já para os concretos confeccionados com agregados reciclados que foram estocados durante sete dias, houve uma pequena diminuição no valor da resistência, cerca de 7%.

- Segundo os autores, reciclando o concreto em idades iniciais com baixo grau de hidratação e reutilizando o agregado reciclado para a confecção de novos concretos pode-se melhorar as propriedades de resistência do concreto reciclado. Esse fato deve-se à existência de partículas não-hidratadas de cimento aderidas aos agregados que acabam contribuindo para a quantidade de cimento na nova mistura.

BARRA & VÁZQUEZ (1998) fizeram algumas considerações com relação à interface pasta-agregado reciclado. Os agregados reciclados foram obtidos do concreto desperdiçado de uma usina de concreto pré-misturado.

Segundo os mesmos pesquisadores, a quantidade de água absorvida pelo agregado reciclado depende fundamentalmente das características do agregado e da consistência da argamassa ou concreto. Para agregados não-saturados, a absorção de água pelos agregados depende da quantidade inicial de água e o tempo que esse permanece em contato com a água; caso o agregado não fique saturado, continuará ocorrendo a absorção de água na mistura fresca. Além disso, a água superficial presente no agregado provoca a retenção de grande quantidade de partículas de cimento na superfície do agregado, resultando numa excelente aderência entre o agregado e a pasta. A mobilização de água do agregado reciclado (semi-saturado ou saturado) para a pasta pode ocorrer de duas maneiras distintas:

- A primeira possibilidade ocorre quando a água migra em direção à pasta após o seu endurecimento. Nessa condição, a água presente no interior do agregado provocará uma “cura interna” que ajudará na melhoria da aderência pasta-agregado.
- A segunda possibilidade ocorre quando o deslocamento de água acontece na pasta no estado fresco. Nessas condições, a saída de água do agregado representará um aumento na relação água/cimento e na porosidade da pasta em contato com o agregado.

Para agregados que estão completamente saturados, o deslocamento de água do agregado para a pasta ocorrerá antes do endurecimento da pasta e, portanto haverá um aumento da porosidade na zona de transição pasta-agregado. A água superficial presente no agregado também causará a retenção de partículas de cimento.

Segundo KIKUCHI et al. (1998) a resistência da argamassa original, a resistência do agregado, os tipos e os métodos de produção do agregado reciclado influenciam consideravelmente na qualidade do agregado reciclado e do concreto confeccionado com esses agregados. A resistência à compressão do concreto original tem efeito significativo sobre a resistência à compressão e a retração por secagem de concretos com agregados reciclados; segundo os pesquisadores, uma alta correlação entre essas propriedades foi observada quando as relações água/cimento dos concretos com agregados reciclados estavam entre 0,35 e 0,45.

Na Figura 2.17, pode ser observada a correlação entre a resistência do concreto original e a resistência do concreto reciclado para diversas relações água/cimento.

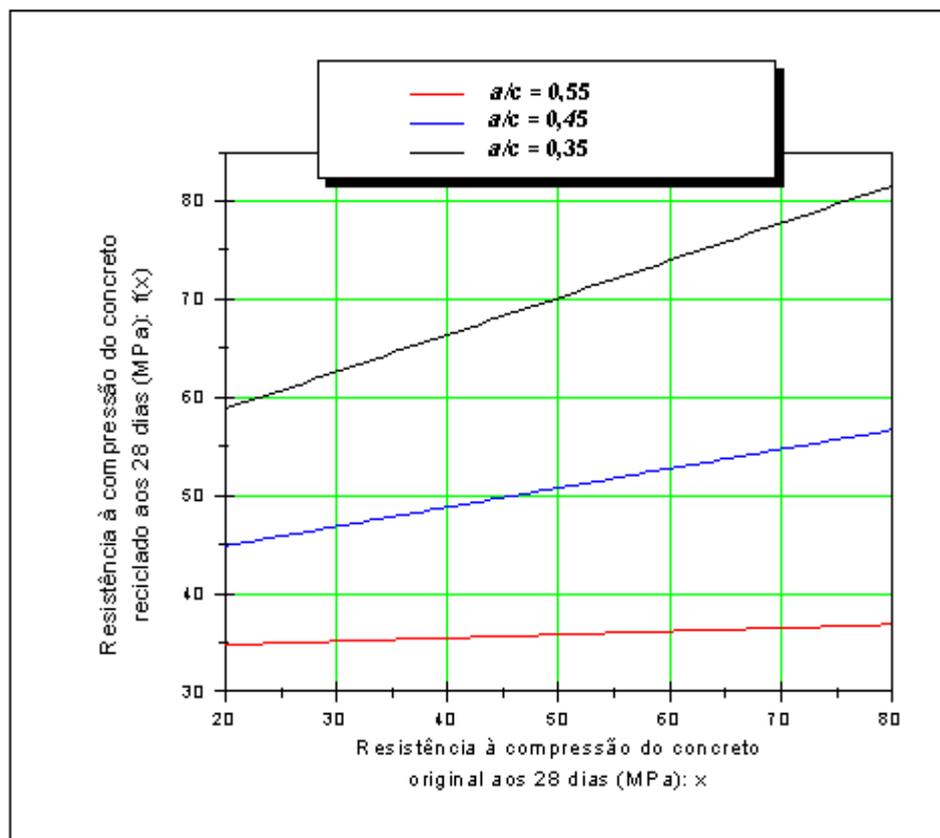


Figura 2.17 - Relação entre a resistência à compressão do concreto original e a resistência à compressão do concreto reciclado (FONTE: KIKUCHI et al., 1998)

MONTGOMERY (1998) estudou o efeito da quantidade de cimento e da argamassa aderida às partículas de agregado reciclado nas propriedades dos concretos que incorporam esses agregados. Numa segunda etapa, verificou a influência da substituição do cimento por agregados miúdos reciclados na resistência à compressão das argamassas.

Analisando os resultados, o pesquisador chegou às seguintes conclusões:

- A qualidade do agregado reciclado de concreto influi significativamente na resistência à compressão. Por exemplo: Para concretos com agregados graúdos reciclados com grande quantidade

de argamassa aderida, a resistência à compressão aos 28 dias foi cerca de 15% menor se comparada com o concreto de referência; já para agregados reciclados que foram submetidos a um processo de abrasão visando diminuir a quantidade de argamassa aderida à sua superfície, essa diferença ficou em torno de seis por cento.

- O abatimento e a massa específica do concreto fresco também são influenciados pela quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado. O abatimento e a massa específica diminuem com o aumento da quantidade de argamassa aderida ao agregado.
- A utilização de agregados miúdos reciclados em substituição ao cimento acarreta uma redução na resistência à compressão quando comparada com a argamassa de controle. Para um nível de substituição igual a 33%, a redução na resistência ficou entre 17 a 32%; para a substituição de até 66%, a redução na resistência foi de cerca de 78%.

GONÇALVES (2000) utilizou as frações miúda e graúda do agregado reciclado, adotando três tipos de dosagens para este material. Os traços utilizados para as dosagens foram iguais, variando somente a composição dos agregados e como parâmetro de controle foi escolhida a relação água/cimento. Foram definidos três tipos de composições de agregados reciclados nas dosagens, utilizando-se a fração miúda ou graúda, ou ambas, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composições de agregados nas dosagens dos concretos (GONÇALVES, 2000)

Dosagem	Composição
1 (concreto natural – referência)	Agregado miúdo – natural Agregado graúdo – natural – brita 1
2	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado
3	Agregado miúdo – 50% de areia + 50% de agregado miúdo reciclado Agregado graúdo – Agregado reciclado
4	Agregado miúdo – 50% de areia + 50% de agregado miúdo reciclado Agregado graúdo – Agregado natural – brita 1

O pesquisador avaliou as propriedades dos agregados reciclados e dos concretos reciclados no estado fresco e endurecido. Analisando os resultados, teceu às seguintes conclusões:

- As propriedades dos agregados reciclados são muito influenciadas pelas características do resíduo de concreto, ou seja, a qualidade do concreto original.
- Os agregados reciclados possuem um valor de massa específica menor que a dos materiais naturais, e uma absorção de água maior.
- A resistência à compressão é pouco influenciada pelos agregados reciclados, diferentemente do valor do módulo de elasticidade que têm uma diminuição considerável.
- A fração miúda reciclada tem uma influência considerável nas propriedades do concreto, principalmente na redução do módulo de elasticidade.

SAGOE-CRENTSIL et al. (2001) confirmam que a camada de argamassa de cimento aderida às partículas de agregado, é que determina o desempenho do concreto confeccionado com agregados reciclados. A argamassa residual presente altera a absorção do agregado e a massa específica e pode ter efeito adverso no desempenho do concreto.

Os pesquisadores utilizaram nas dosagens com agregados graúdos reciclados, dois tipos de cimento: cimento comum e cimento com escória de alto forno. O cimento com escória foi utilizado com o objetivo de obter melhorias na coesão do concreto fresco, trabalhabilidade e desempenho do concreto reciclado. As relações água/cimento de todas as misturas foram ajustadas de forma a obter uma consistência semelhante; sendo que os agregados graúdos reciclados foram pré-saturados durante dez minutos para evitar que absorvessem grande quantidade de água na mistura.

Com relação às propriedades do concreto no estado endurecido chegaram as seguintes conclusões:

- A resistência à compressão de concretos reciclados equivale-se à resistência à compressão dos concretos com agregados naturais. O concreto reciclado com cimento de escória de alto forno apresentou um ganho significativo de resistência entre os 7 e 28 dias; de 20,2MPa para 32,6MPa; enquanto para os concretos de cimento Portland, esse ganho de resistência foi de apenas 6MPa.
- A resistência à tração depende principalmente do tipo de cimento do que do agregado. Com relação aos concretos reciclados, obteve-se resultados bastante satisfatórios para a resistência à tração devido à boa aderência entre o agregado reciclado e a matriz de argamassa.

AJDUKIEWICZ & KLISZCZEWICZ (2002) estudaram resíduos de concretos provenientes de estruturas confeccionadas com concreto de média e alta resistência. Tais concretos apresentavam resistências variando de 40MPa a 70MPa e caracterizavam-se por apresentar um elevado

consumo de cimento. Segundo os autores, no Leste Europeu está ocorrendo um programa intensivo de modernização e reconstrução de rodovias e pontes desde o início da década de 90. Devido a isso, está sendo gerada uma grande quantidade de resíduos provenientes de estruturas de concreto armado e pretendido os quais, apresentam um grande potencial para ser reutilizado como agregados. Acredita-se que os agregados reciclados provenientes de concretos com elevado consumo de cimento possuam propriedades aglomerantes, esse fato pode ser importante do ponto de vista econômico devido à redução no consumo de cimento.

Os pesquisadores utilizaram agregados reciclados provenientes de seis estruturas distintas. As estruturas foram demolidas com dois, cinco ou sete anos de idade, sendo que em cinco delas foram utilizados agregados graníticos e em apenas uma o agregado basáltico. Os agregados reciclados foram utilizados cerca de dois a três meses após a britagem.

Os concretos com agregados graúdos reciclados que foram provenientes de resíduos de concreto com resistência superior a 60MPa e alto consumo de cimento (550kg/m^3), apresentaram valores de resistência à compressão superior aos obtidos para o concreto com agregados naturais e valores praticamente similares com relação ao módulo de elasticidade. Com relação à retração por secagem, os pesquisadores notaram a influência significativa dos agregados reciclados. A retração dos concretos reciclados é cerca de 35 a 45% maior do que a retração dos concretos com agregados naturais. Para a fluência foram observados valores até 20% menores para o concreto com agregados reciclados se comparado com o concreto de referência. De maneira geral, o efeito conjunto da fluência e da retração é ligeiramente maior para o concreto reciclado se comparado com o concreto de agregados naturais.

Os resultados obtidos pelos mesmos pesquisadores evidenciam que as propriedades dos resíduos de concreto têm influência significativa nas propriedades mecânicas do concreto com agregados graúdos reciclados,

sendo possível obter concretos reciclados com resistência superior ao concreto com agregados naturais.

KREZEL & McMANUS (2002) desenvolveram barreiras acústicas confeccionadas com concreto reciclado. Nas dosagens empregou-se apenas a fração graúda reciclada sendo que todas se caracterizavam por apresentarem deficiência da fração miúda visando produzir um concreto com duas camadas distintas; uma delas, sólida com baixa porosidade proporcionando suporte estrutural e rigidez ao painel acústico e, outra camada com alta porosidade visando conferir propriedades de absorção sonora e reflexão das demais ondas sonoras. De maneira geral, os resultados encontrados pelos pesquisadores foram muito satisfatórios permitindo a aplicação de resíduos de concreto para a confecção de barreiras acústicas. Na Figura 2.18, observa-se um dos painéis acústicos confeccionados.



Figura 2.18 – Painel acústico confeccionado com concreto reciclado

(FONTE: KREZEL & McMANUS, 2002)

PADMINI et al. (2002) avaliaram aspectos relativos à durabilidade do concreto reciclado; para isso, determinaram-se características relativas à permeabilidade do material (absorção e volume de poros permeáveis - vazios). Os agregados reciclados foram provenientes de concretos com agregados naturais que apresentavam resistências variadas, as propriedades físicas dos agregados reciclados e do agregado natural podem ser observadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades físicas dos agregados reciclados e do agregado natural (PADMINI et al., 2002)

Agregado	Resistência do concreto original (MPa)	Dimensão máxima do agregado (mm)	Massa especif. (kg/dm ³)	Absorção (%)	Massa Unitária (kg/m ³)	
					Solto	Compactado
Agregado natural granítico		10	2,8	0,3	1408	1561
		20	2,8	0,3	1462	1625
		40	2,8	0,3	1406	1590
Reciclado	35	10	2,46	4,6	1338	1468
	49		2,40	4,8	1327	1438
	56		2,38	5,0	1324	1427
	37	20	2,52	3,65	1432	1568
	50		2,51	4,1	1421	1536
	58		2,48	4,86	1394	1498
	31	40	2,56	2,2	1341	1480
	45		2,53	2,5	1334	1474
	52		2,52	2,8	1329	1470

Após a confecção dos concretos utilizando os agregados graúdos apresentados na Tabela 2.2, os pesquisadores avaliaram diversas propriedades e suas inter-relações. As principais discussões são apresentadas abaixo:

- Para uma dada resistência, o volume de vazios dos concretos reciclados é ligeiramente menor quando comparado com o concreto natural. Este comportamento é atribuído a menor relação água/cimento adotada para o concreto reciclado para que seja alcançada uma resistência similar à

obtida para o concreto natural. Portanto para uma determinada trabalhabilidade, uma menor relação água/cimento resulta num maior consumo de cimento para o concreto reciclado ocasionando um menor índice de vazios.

- A qualidade do agregado reciclado tem pequena influência na variação do volume de vazios.
- Para uma determinada resistência, um agregado com maior dimensão máxima ocasiona uma redução na absorção de água do concreto reciclado.
- Apesar do agregado reciclado apresentar uma absorção de água significativamente superior àquela obtida pelo agregado natural, às diferenças encontradas entre a absorção de água do concreto reciclado e do concreto natural foram muito pequenas; esse fato deve-se as características da nova matriz de cimento do concreto reciclado. Para uma determinada resistência, o concreto reciclado requer uma menor relação água/cimento e, conseqüentemente um maior consumo de cimento quando comparado com o concreto de referência; portanto, haverá a formação de uma nova matriz que apresentará menor permeabilidade devido a esse consumo de cimento e, que conduzirá a resultados praticamente similares entre a absorção do concreto reciclado e o natural.
- A absorção de água do concreto é maior para concretos confeccionados com agregados originários de resíduos de resistência elevada. Esse fato deve-se a maior quantidade de argamassa aderida a esses agregados.

POON et al. (2002) produziram blocos de concreto (225x105x75)mm³ e blocos de pavimentação utilizando a fração graúda e miúda dos agregados reciclados. Inicialmente, foram estabelecidas três séries de dosagens: 1) Blocos de concreto utilizando cinza volante com substituição de 25% a 100% dos agregados naturais por reciclados e, que apresentassem resistência à

compressão aos 28 dias superior a 7MPa, conforme prescrito pela BS 6073; 2) Blocos de pavimentação com adições de 50% a 100% de reciclados em substituição aos agregados naturais e, que apresentassem resistência mínima de 49MPa aos 28 dias; 3) Blocos de pavimentação utilizando cinza volante com adições de 25% a 100% de reciclados em substituição aos agregados naturais e que apresentassem resistência mínima de 30MPa aos 28 dias. Com relação aos blocos de concreto, todas as dosagens satisfizeram as exigências da BS 6073. Os resultados obtidos por POON et al. (2002) podem ser observados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Resultados obtidos para os blocos de concreto (POON et al., 2002)

Dosagem	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Retração por secagem (%)	Densidade (kg/m ³)
Referência	16,2	1,76	0,040	2210
25% reciclados	15,9	1,80	0,042	2195
50% reciclados	16,7	1,87	0,044	2150
75% reciclados	15,0	1,95	0,046	2120
100% reciclados	11,8	1,99	0,052	2060

Na Tabela 2.4, são encontrados os resultados obtidos para os blocos de pavimentação sem a adição de cinza volante.

Tabela 2.4 – Resultados obtidos para os blocos de pavimentação (POON et al., 2002)

Dosagem	Resist. à compressão (MPa)	Resist. à flexão (MPa)	Retração por secagem (%)	Resistência ao deslizamento	Densidade (kg/m ³)
Referência	58,6	3,31	0,027	98	2328
50% reciclados	62,1	3,74	0,030	110	2281
100% reciclados	51,2	3,81	0,038	108	2258

Na Tabela 2.5, são encontrados os resultados obtidos para os blocos de pavimentação com a adição de cinza volante.

Tabela 2.5 – Resultados obtidos para os blocos de pavimentação com a adição de cinza volante (POON et al., 2002)

Dosagem	Resist. à compressão (MPa)	Resist. à flexão (MPa)	Retração por secagem (%)	Resistência ao deslizamento	Densidade (Kg/m³)
Referência	46,6	3,30	0,026	95	2285
25% reciclados	44,7	3,30	0,026	112	2257
50% reciclados	46,5	3,32	0,029	112	2245
75% reciclados	45,4	3,53	0,034	114	2193
100% reciclados	40,1	3,63	0,036	106	2167

Analisando-se os resultados apresentados, POON et al. (2002) estabeleceram as seguintes conclusões:

- Substituições de até 50% de agregados naturais por reciclados não causarão diferenças significativas nas propriedades de resistência à compressão e retração por secagem. Para substituições maiores, ocorrerá uma diminuição da resistência à compressão e um aumento mais pronunciado da retração por secagem; por outro lado, a resistência à flexão aumentará proporcionalmente com a elevação da taxa de substituição dos agregados naturais por reciclados.
- Para os blocos de pavimentação, os resultados de resistência ao deslizamento foram superiores para todas as dosagens que utilizaram agregados reciclados independente da taxa de substituição utilizada.

RYU (2002) estudou a influência do agregado reciclado sobre as propriedades da zona de transição, a permeabilidade e a resistência do

concreto. Na sua pesquisa, foram avaliados cinco tipos de agregados reciclados e quatro relações água/cimento foram utilizadas na confecção dos concretos reciclados. As propriedades dos resíduos de concreto são encontradas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Propriedades dos resíduos de concreto (RYU, 2002)

Concreto	Relação a/c	Consumo de materiais (kg/m ³)				Resistência à compressão (MPa)	
		Água	Cimento	Miúdo	Graúdo	7 dias	28 dias
A2	0,35	170	486	679	986	47,1	56,1
B1, B2, B3	0,45	170	378	749	1004	33,8	40,5
C2	0,625	167	268	867	988	18,1	24,4

Esses resíduos foram britados e peneirados dando origem aos agregados graúdos reciclados (A2, B1, B2, B3 e C2) que se diferenciavam em função da resistência do concreto original e da quantidade de argamassa aderida. Para os concretos foram utilizadas quatro relações água/cimento: 0,25; 0,40; 0,55; 0,70 e, para que o “slump” se mantivesse em torno de 100mm empregaram-se aditivos.

As características da zona de interface foram avaliadas através do ensaio denominado “*Vickers Hardness*”, que consiste na medição da resistência em cerca de 14 pontos distantes de 10 a 200µm da superfície do agregado. Numa segunda etapa, foram avaliadas as características de permeabilidade do concreto reciclado através de um ensaio de carbonatação acelerada e, finalmente as características mecânicas do concreto através da resistência à compressão e tração.

Os resultados encontrados pelo pesquisador e algumas de suas conclusões encontram-se abaixo:

- A resistência da zona de interface aumenta quando a relação água/cimento diminui. A resistência da nova zona de transição dos

concretos reciclados apresentou resultados similares aos obtidos para os concretos com agregados naturais.

- Para os concretos reciclados que empregaram uma relação água/cimento igual a 0,55; a resistência da argamassa aderida ao agregado reciclado mostrou-se superior à resistência da nova zona de transição, especialmente para agregados que foram originários de resíduos de qualidade superior. Para relações água/cimento iguais a 0,25 e 0,40; a resistência da nova zona de transição apresentou valores superiores aos obtidos para a resistência da argamassa aderida.
- A relação água/cimento afeta a permeabilidade do concreto, sendo que para os concretos reciclados os resultados de permeabilidade foram superiores aos obtidos para os concretos de referência. A qualidade do agregado reciclado tem pequena influência nessa propriedade.
- Quando se utiliza uma relação água/cimento elevada, a resistência não é afetada pelas características do agregado reciclado. Entretanto quando se emprega uma relação água/cimento baixa, as características do agregado reciclado influenciam significativamente na resistência à compressão e tração.
- As características de resistência do concreto reciclado dependem da qualidade da nova zona de transição, especialmente quando a qualidade da argamassa aderida apresenta características superiores às encontradas para a nova zona de transição. Por outro lado, as características de resistência do concreto reciclado dependem da qualidade da argamassa aderida ao reciclado, especialmente quando a qualidade da nova zona de transição apresenta características superiores às encontradas para a argamassa aderida.

2.2.4. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Neste tópico serão tratados aspectos normativos, resoluções e decretos referentes à disposição de resíduos sendo que alguns destes contemplam diretrizes visando a re-inserção do resíduo como agregado em novas dosagens. A adoção desses critérios visa também disciplinar a utilização dos agregados reciclados, garantindo sua correta aplicação e desempenho satisfatório.

Apenas alguns países como a Alemanha, Dinamarca, Holanda e Japão possuem recomendações normativas com relação aos materiais reciclados. Além desses, destacam-se as pesquisas e os relatórios publicados pela RILEM e pela Delft University of Technology envolvendo a utilização de agregados reciclados.

As especificações da RILEM (1994), classificam os agregados graúdos reciclados em diferentes categorias e indicam o campo de aplicação dos concretos contendo esses agregados em termos de classe de exposição e classes de resistência de acordo com o EUROCODE 2. Sua principal recomendação refere-se à adoção de coeficientes de projeto a serem utilizados no cálculo de elementos estruturais que sejam confeccionados com concretos com agregados graúdos reciclados, conforme sua origem, e as restrições à sua utilização.

Segundo as recomendações da RILEM (1994), a classificação dos resíduos de concreto é feita em dois tipos de categorias:

Tipo II – agregados graúdos provenientes totalmente de resíduos de concreto;

Tipo III – agregados provenientes de uma mistura de agregados naturais e reciclados, onde as seguintes considerações devem ser respeitadas:

- Porcentagem mínima de agregados naturais é 80%;

- Porcentagem máxima de agregados provenientes de resíduos de alvenaria é 10%;

Outras recomendações referem-se a aspectos relacionados ao meio-ambiente e saúde. Nesse caso, os seguintes tópicos devem ser contemplados:

- Contaminação dos agregados reciclados por metais pesados;
- Características de lixiviação;
- Presença de materiais radioativos;

Para cada agregado reciclado são apresentadas as classes de resistência do concreto reciclado, Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Classe de resistência permitida. (RILEM, 1994)

Agregado Tipo II	C50 – C60
Agregado Tipo III	Sem limites

O instituto de pesquisa também recomenda que deve ser dada atenção a aspectos relacionados com a durabilidade do concreto armado reciclado. No caso da utilização dos agregados reciclados em estruturas, nas quais as propriedades de deformação sejam importantes, são sugeridos que sejam feitos ensaios com o material, para obter dados mais precisos.

Na ausência de valores experimentais mais precisos para elementos de concreto reciclado, as recomendações fornecem coeficientes de correção, que são multiplicados pelos valores encontrados para os concretos naturais com as mesmas características do reciclado. Por exemplo, para obter a retração de um concreto reciclado tipo II, calcula-se utilizando as formulações do ACI 209R-92 o valor da retração para o concreto natural e depois é só multiplicá-lo pelo coeficiente apresentado na RILEM (1994), nesse caso 1,5, Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Coeficientes de projeto para o concreto reciclado. (RILEM, 1994)

Propriedade	Agregado TIPO II	Agregado TIPO III
Resistência à Tração (f_{ctm})	1	1
Módulo de Elasticidade (E_{cm})	0,8	1
Coefficiente de Fluência ($\phi(\infty, t_0)$)	1	1
Retração (ϵ_{cso})	1,5	1

Segundo GLAVIND & HAUGAARD (1998), existem algumas recomendações dinamarquesas envolvendo agregados reciclados de concreto, publicadas pela Danish Concrete Association. Essas recomendações fornecem aspectos referentes à esfera de aplicação, terminologias, classificação dos agregados reciclados e regras para a utilização dos agregados reciclados.

De acordo com essas recomendações, os agregados reciclados são divididos em duas classes: Classe GP1 – massa específica superior a 2200kg/m^3 , contendo basicamente resíduos de concreto com pequena quantidade de alvenaria e Classe GP2 – massa específica superior a 1800kg/m^3 , contendo reciclados de concreto e alvenaria ou somente alvenaria. Os materiais da classe GP1 podem ser utilizados para concreto armado ou não-armado, em ambientes pertencentes à classe passiva ou moderada com resistências de até 40MPa. Os materiais definidos como sendo da classe GP2 podem ser utilizados para concreto armado ou não-armado, em ambientes pertencentes à classe passiva com resistências de até 20MPa.

Segundo GRÜBL & RÜHL (1998), será adicionado a Norma Alemã DIN-1045 “Concrete and Reinforced Concrete”, um código normativo denominado “Concrete with Recycled Aggregate derived from Concrete Rubble” visando regular a utilização de agregados reciclados de concreto.

Esse código impõe algumas limitações com relação à utilização de concretos com agregados reciclados em ambientes externos. Sua aplicação nesses ambientes só será concedida quando ficar provada a imunidade do agregado reciclado à reação álcali-silica.

Segundo HENDRIKS et al. (1998), os agregados reciclados são especificados pela Norma Holandesa NEN 5905:1997 “Aditives for Concrete. Materials with a volumic mass of at least 2000kg/m³”. Essa norma contém os critérios de qualidade para os agregados reciclados, como por exemplo: formato da partícula, distribuição granulométrica, porcentagem de miúdos, massa específica, presença de cloretos e sulfatos, etc. De uma maneira geral, os critérios utilizados para os agregados reciclados são semelhantes aos exigidos para os agregados naturais.

Segundo a Norma Holandesa NEN 6720 “Construction Requirements and Calculating Methods (VBC 1995)” permite-se a substituição de até 20% dos agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto. Para agregados reciclados de alvenaria, a taxa de substituição é de no máximo 10%. O projeto holandês para norma (VTB-1986), estabelece que a altura das peças estruturais, cujas dimensões sejam determinadas em função das tensões máximas toleradas, seja acrescida em 10%, pois, em geral o concreto produzido com agregados reciclados terá módulo de elasticidade menor e maior deformação lenta, do que o concreto produzido com agregados convencionais.

Segundo ASSIS & OLIVEIRA (2000), a Prefeitura Municipal de São Paulo através do Decreto N° 37.952, de 10 de maio de 1999, tenta disciplinar a coleta e a destinação final dos materiais descartados pelas obras de construção; entretanto, o Decreto não faz qualquer menção sobre o gerenciamento, manuseio, estações de transbordo, a forma de escolha dos locais de deposição final e sobre as regiões potenciais para execução dos aterros de rejeitos.

De maneira geral segundo os pesquisadores, por falta de um embasamento científico e pela deficiência de clareza no texto do Decreto Nº 37.952, o mesmo tem se mostrado ineficaz no tratamento da questão da coleta e da disposição final dos resíduos da construção civil na cidade de São Paulo, tanto a coleta como a disposição final do entulho está sendo realizada de acordo com as necessidades dos geradores e das empresas coletoras que efetuam o descarte do entulho em locais inadequados provocando diversos prejuízos ao meio-ambiente e à população.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002) publicou uma resolução, em 05 de julho de 2002, que dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil. Para efeito dessa resolução, são adotadas as seguintes definições:

- A) Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos.
- B) Geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos.
- C) Transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte de resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação.
- D) Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.
- E) Gerenciamento de resíduos: é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento,

responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias.

- F) Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo.
- G) Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação.
- H) Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.
- I) Aterro de resíduos da construção civil: é a área onde serão empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, sem causar danos à saúde pública e ao meio-ambiente.
- J) Área de destinação de resíduos: são áreas destinadas ao beneficiamento ou à disposição final de resíduos.

Seguindo essa resolução, os resíduos são classificados da seguinte forma:

- 1) Classe A: são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados.
- 2) Classe B: são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, metais, vidros, madeiras e outros.
- 3) Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.

- 4) Classe D: são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros.

Alguns dos pontos fundamentais dessa resolução são enumerados a seguir:

- Os geradores deverão ter como objetivo prioritário, a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final; sendo que os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei.
- Para a implementação da gestão dos resíduos da construção civil, deverá ser elaborado pelos Municípios e Distrito Federal, o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, contemplando os seguintes itens: 1) cadastramento de áreas, aptas para recebimento, triagem e armazenamento temporário de pequenos volumes, possibilitando a destinação posterior dos resíduos às áreas de beneficiamento; 2) proibição da disposição dos resíduos de construção em áreas não licenciadas; 3) incentivo à reinserção dos resíduos reutilizáveis ou reciclados no ciclo produtivo; 4) ações de orientação, de fiscalização e de controle dos agentes envolvidos; 5) ações educativas visando reduzir a geração de resíduos e possibilitar a sua segregação.
- Os resíduos da construção civil deverão ser destinados das seguintes formas: 1) Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura; 2) Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura; 3)

Classe C e Classe D: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

- Os Municípios e o Distrito Federal têm o prazo máximo de doze meses para que elaborem seus Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil, e o prazo máximo de dezoito meses para sua implementação.
- A Resolução entra em vigor a partir de 2 de janeiro de 2003.

A retração por secagem em estruturas de concreto armado é um fenômeno inevitável ao concreto, desde que exposto à umidade abaixo da condição de saturação. Segundo BASTOS & CINCOTTO (2000), a retração em compósitos à base de cimento é ligada diretamente à ocorrência de fenômenos patológicos nas construções, sendo uma das principais causas da fissuração e a ocorrência desta última, está ligada diretamente à durabilidade do concreto.

“A retração é provavelmente uma das propriedades menos desejáveis do concreto. Quando restringida, a retração pode resultar em fissurações, fato este que pode prejudicar a aparência do concreto e o torna mais vulnerável ao ataque por agentes externos, prejudicando a sua durabilidade. Mas, mesmo a retração não restringida é prejudicial: elementos de concreto não adjacentes se contraem afastando-se uns dos outros, abrindo, assim, fissuras externas. A retração também é responsável pela perda parcial de protensão dos cabos de concreto protendido” (NEVILLE, 1997).

No caso de concretos com agregados reciclados, a retração por secagem é um importante aspecto a ser analisado, pois está ligada intimamente a durabilidade do concreto. O agregado reciclado possui uma camada de argamassa aderida a sua superfície e isso influencia numa maior demanda de água pelos agregados, fato este que ocasiona uma maior retração por secagem. Inúmeros pesquisadores relatam que concretos feitos com agregados graúdos reciclados e areia natural apresentam uma retração cerca de 30 a 40% superior à retração apresentada pelo concreto confeccionado com agregados naturais.

3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE RETRAÇÃO

Segundo BASTOS & CINCOTTO (2000), a retração pode ser de diferentes naturezas e ocorrer em diferentes fases do endurecimento do compósito de cimento. Estas e outras considerações levam à classificação dos vários tipos de retração por grupos, identificando o fenômeno quanto: ao estado físico da mistura, à natureza, ao grau de restrição e à sua permanência.

1) Quanto ao estado físico da mistura

- Retração plástica

Retração por perda de água da pasta, argamassa ou concreto no estado fresco. Ocorre antes da pega do cimento, quando as partes sólidas da mistura estão livres para mover-se e a diminuição de volume do sistema é igual ao volume de água perdida na secagem. Nessa etapa, pode haver fissuração se a quantidade de água perdida por unidade de área for grande e maior do que a água que sobe à superfície por efeito da exsudação.

- Retração no estado endurecido

Retração em pasta, argamassa ou concreto após a pega do cimento. A magnitude da retração total depende diretamente do grau de dificuldade encontrado para a remoção da água e das propriedades mecânicas do compósito. A retração no estado endurecido depende fundamentalmente da forma como a água está ligada às partes sólidas da pasta endurecida e do tamanho e tipo de espaço de onde sai a água.

2) Quanto à natureza do fenômeno

- Retração por perda de água ou retração por secagem

A retração por secagem pode ocorrer na pasta, argamassa ou concreto, tanto no estado fresco como no endurecido.

- Retração por Hidratação ou Retração Química

Na hidratação do cimento, o volume total dos hidratos formados é inferior ao volume absoluto inicial (soma dos volumes absolutos da água e do cimento anidro). Esse fenômeno foi descoberto por Le Chatelier e é chamado de “Contração de Le Chatelier” sendo da ordem de 10% do volume inicial da pasta. No entanto, o volume correspondente a essa contração não implica numa diminuição de volume aparente do compósito da mesma ordem de grandeza, uma vez que a estrutura da pasta endurecida também contém vazios.

- Retração Autógena ou Endógena

Ocorre num sistema fechado, sem trocas de umidade com o meio externo. Essa retração pode ser verificada no interior de uma massa volumosa de concreto ou em corpos-de-prova protegidos da troca de água com o meio. O processo ocorre quando há um consumo de água dos capilares num processo conhecido como auto-secagem, no interior da pasta, hidratando a fração anidra remanescente do cimento. NEVILLE (1997) cita

que a retração autógena é relativamente pequena, exceto com relações água/cimento extremamente baixas e, para efeitos práticos, não precisa ser diferenciada da retração por secagem.

- Retração por Carbonatação

O CO_2 do ar reage com os compostos hidratados do cimento causando retração (TAYLOR¹, 1992 apud BASTOS & CINCOTTO; NEVILLE, 1997). A carbonatação provoca, ao mesmo tempo, aumento de massa e diminuição do volume na pasta de cimento endurecida. A retração devida a carbonatação é causada por dois mecanismos: a perda de água da reação química de carbonatação e a dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ em zonas onde ele está sob tensão.

- Retração Térmica

A retração térmica pela diminuição da temperatura pode ocorrer de duas maneiras diferentes:

A) Após ter-se dado o pico de evolução da temperatura por acúmulo de calor de hidratação;

B) Após o aquecimento por exposição a uma fonte de calor externa;

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), problemas com retração térmica ligada à hidratação do cimento acontecem, principalmente, em grandes massas de concreto, onde o esfriamento à temperatura ambiente pode levar à fissuração.

¹ TAYLOR, H.F. (1992). Cement Chemistry, 2.ed., San Diego, Academic Press apud BASTOS, P. K.; CINCOTTO, M. A. (2000). Retração de Compósitos à Base de Cimento. São Paulo – PCC/USP.

3) Quanto ao Grau de Restrição

- Retração Livre

Retração em pasta, argamassa ou concreto caracterizado pela liberdade para retrair-se pelo fato de não estar aderido a uma base porosa ou outro elemento estrutural. A retração em corpos-de-prova é chamada de retração livre.

- Retração Restringida ou Impedida

Neste tipo de retração, a peça não está livre para mover-se resultando numa deformação nula. A restrição provoca o aparecimento de tensões de tração no material, podendo ocorrer fissuração dependendo da combinação de sua intensidade com a resistência à tração e o módulo de deformação da argamassa ou do concreto. Exemplos: restrição pela presença do agregado em argamassas e concreto, restrição por causa da aderência da pasta, argamassa ou concreto a uma base, restrição devida a ligações entre elementos estruturais de concreto, restrição devida à aderência do concreto à armadura.

4) Quanto a Permanência do Fenômeno

Segundo BASTOS & CINCOTTO (2000), essa classificação relaciona-se com ciclos de molhagem e secagem dos compósitos à base de cimento, isso leva à classificação da retração quanto à sua irreversibilidade ou quanto à sua reversibilidade.

- Retração reversível: Parcela da retração recuperada com a molhagem da pasta de cimento após secagem.
- Retração irreversível ou permanente: Parcela da retração que permanece em ciclos de molhagem/secagem. A maior parte da retração irreversível ocorre na 1^o secagem e deve-se esta irreversibilidade a ligação entre partículas sólidas na 1^o secagem.

3.1.1. AVALIAÇÃO TEÓRICA DA RETRAÇÃO (ACI 209R-92)

O ACI 209R-92 fornece métodos simplificados para a análise da retração e fluência do concreto. Segundo o ACI, a retração, depois do endurecimento do concreto, pode ser definida como a redução do volume do concreto com o tempo. Este decréscimo é devido a mudanças na umidade e a processos físico-químicos que ocorrem no concreto, os quais ocorrem sem o surgimento de tensões atribuídas as ações externas. O termo retração, segundo prescrito pelo ACI, refere-se à retração por secagem, retração autógena e retração por carbonatação.

Para determinar a retração do concreto em qualquer idade, a seguinte formulação genérica é proposta pelo ACI, eq. (3.1):

$$(\varepsilon_{sh})_t = \left(\frac{t^\alpha}{f + t^\alpha} \right) \times (\varepsilon_{sh})_u \quad (3.1)$$

onde:

f = tempo, dias

α = constantes dependentes do tamanho e formato do corpo-de-prova

$(\varepsilon_{sh})_u$ = deformação última por retração

t = tempo decorrido após o período inicial de cura

$(\varepsilon_{sh})_t$ = deformação por retração numa idade qualquer

Essa formulação baseia-se em algumas condições padronizadas pelo ACI, para quaisquer outras condições são fornecidas equações que permitem obter valores de correção. Para determinar a retração em qualquer idade após sete dias de cura úmida, é proposta a seguinte formulação, eq. (3.2):

$$(\varepsilon_{sh})_t = \left(\frac{t}{35 + t} \right) \times (\varepsilon_{sh})_u \quad (3.2)$$

A deformação última por retração $(\epsilon_{sh})_u$ é fornecida pela seguinte expressão, eq. (3.3):

$$(\epsilon_{sh})_u = 780 \times 10^{-6} \times \gamma_{sh} \text{ (m/m)} \quad (3.3)$$

onde:

γ_{sh} = produto final de inúmeros fatores de correção (γ_λ - umidade; γ_h - espessura média; γ_s - slump; γ_ψ - porcentagem de agregados miúdos; γ_c - consumo de cimento)

Para condições de umidade relativa situada entre 40% e 80% é fornecida a seguinte equação, eq. (3.4):

$$\gamma_\lambda = 1,40 - 0,010 \times \lambda \quad (3.4)$$

onde: λ = umidade relativa, %

Para avaliar a influência do tamanho e o formato do elemento na retração por secagem, são propostos os seguintes fatores de correção, tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Fatores de correção com relação à espessura média do prisma

Espessura média (mm)	Fatores de correção (γ_h)
51	1,35
76	1,25
104	1,17
127	1,08

Com relação ao abatimento do concreto, é fornecida a seguinte equação que permite determinar o fator de correção, eq. (3.5):

$$\gamma_s = 0,89 + 0,00161 \times s \quad (3.5)$$

onde: s = abatimento, mm

Com relação à porcentagem de agregados miúdos na mistura, o ACI fornece a seguinte formulação para determinação do fator de correção quando a porcentagem de miúdos for inferior a 50% do total, eq. (3.6):

$$\gamma_{\psi} = 0,30 + 0,014 \times \psi \quad (3.6)$$

onde: ψ = porcentagem de agregados miúdos em relação ao total

A influência do consumo de cimento na retração pode ser encontrada através da formulação proposta pela eq. (3.7):

$$\gamma_c = 0,75 + 0,00061 \times c \quad (3.7)$$

onde: c = consumo de cimento, kg/m^3

Através desses diversos fatores de correção, pode-se obter o fator (γ_{sh}), eq. (3.8):

$$\gamma_{sh} = \gamma_{\lambda} \times \gamma_h \times \gamma_{\psi} \times \gamma_c \quad (3.8)$$

3.2. RETRAÇÃO POR SECAGEM

A retração por secagem pode ocorrer no estado plástico ou no estado endurecido. Segundo NEVILLE (1997), a retração plástica ocorre quando se perde água por evaporação da superfície do concreto ainda em estado plástico, sendo influenciada pela temperatura, umidade relativa e pela velocidade do vento. Segundo BASTOS & CINCOTTO (2000), essa retração pode ser diminuída pelo ajuste de dosagem que evite exsudação, pela proteção da peça concretada contra a evaporação e pelo uso de aditivos retentores de água. MEHTA & MONTEIRO (1994) citam exemplos de laje,

na qual a secagem rápida do concreto provoca retração plástica quando a taxa de perda de água da superfície por evaporação excede a taxa disponível de água de exsudação.

A retração no estado endurecido ocorre na pasta de cimento saturada que não permanece dimensionalmente estável quando exposta a umidades ambientais que estão abaixo da sua saturação (FURNAS, 1997). A retração na pasta endurecida pode ocorrer com maior ou menor intensidade dependendo de onde se dá à saída de água.

Inicialmente ocorre a perda de água livre retida nas grandes cavidades. Essa água livre não está presa à estrutura dos produtos hidratados por ligações físico-químicas fortes e, portanto a sua perda não é acompanhada de retração significativa. Assim, uma pasta saturada exposta a uma umidade relativa inferior a 100% perderá uma quantidade considerável de água evaporável antes de sofrer retração intensa (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Quando a maior parte da água livre for perdida, qualquer perda adicional de água passa a resultar em retração considerável. Esse fenômeno é atribuído principalmente à perda de água adsorvida e de água retida em pequenos capilares. A água adsorvida, quando confinada em espaços estreitos entre duas superfícies sólidas, causa pressão de desligamento; a remoção dessa água adsorvida reduz a pressão de desligamento e causa a retração do sistema (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

A água interlamelar, presente na forma de um filme monomolecular de água entre as camadas da estrutura do C-S-H, pode também ser removida por condições severas de secagem. A água presente em pequenos capilares (5 a 50nm) exerce pressão hidrostática e sua remoção tende a induzir uma tensão de compressão sobre as paredes sólidas do poro capilar, causando também contração do sistema (MEHTA & MONTEIRO, 1994; BASTOS & CINCOTTO, 2000). A água quimicamente combinada que é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados do cimento,

somente é perdida a temperaturas acima de 100^o, por exemplo, em incêndios (MEHTA & MONTEIRO, 1994; BASTOS & CINCOTTO, 2000).

3.2.1. FATORES QUE AFETAM A RETRAÇÃO POR SECAGEM

Inúmeros fatores podem influenciar a retração por secagem, tais como: as condições ambientais, tipo litológico dos agregados, dimensão máxima característica, propriedades físicas do agregado, proporções do material (principalmente a quantidade de água), microfissuras (interface pasta/agregado), cura do concreto e outros (FURNAS, 1997).

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a retração por secagem é influenciada principalmente pelo módulo de deformação do agregado; a influência das outras características do agregado pode ser indireta, isto é, através do seu efeito no conteúdo de agregado do concreto ou na capacidade de adensamento da mistura de concreto. A influência das características do agregado, principalmente o módulo de deformação, foi confirmada pela pesquisa de TROXELL² et al. apud MEHTA & MONTEIRO (1994) sobre fluência e retração do concreto. Os resultados do pesquisador mostram que a retração por secagem aumentou cerca de 2,5 vezes quando um agregado com alto módulo de deformação foi substituído por um agregado com baixo módulo de deformação.

Segundo FURNAS (1997), a capacidade das partículas de agregado em restringir as deformações da pasta de cimento depende de vários fatores importantes:

- Extensibilidade relativa da pasta e a compressibilidade do agregado (módulo de elasticidade);

² TROXELL, G. E.; RAPHAEL, J. M.; DAVIS, R. E. (1958). Proceedings ASTM, v.58, p.1101-1120 apud MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. (1994). Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. Editora Pini, São Paulo.

- A ligação ou contato entre a pasta e o agregado;
- A contração da pasta no estado fresco;
- O grau de fissuração da pasta de cimento;
- A variação de volume das partículas de agregado devido à secagem.

O efeito do tamanho do agregado na retração por secagem foi avaliado por FURNAS (1997). A relação água/cimento foi mantida igual a 0,40 e a dosagem 1:1, tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Efeito da composição da pasta de cimento com agregados de dolomita de diversas granulometrias (FURNAS, 1997)

Tamanho do agregado	Pasta de cimento	Faixa Granulométrica (mm)					
		0,3 a 0,6	0,6 – 1,2	1,2 – 2,4	2,4 – 4,8	4,8 – 9,5	9,5 – 19
Retração a 1 ano (x 10 ⁻⁶)	2710	1190	1240	1220	1160	940	690

A utilização de menos água de amassamento reduzirá substancialmente a retração. Um aumento no volume de água do concreto não irá somente aumentar a relação água/cimento, mas irá também reduzir o volume de agregado, conseqüentemente aumentando a retração do concreto. Para uma dada relação água/cimento, tanto a retração por secagem como a fluência aumenta com o aumento do consumo de cimento (MEHTA & MONTEIRO, 1994; FURNAS, 1997).

A influência da duração da cura úmida na retração por secagem foi avaliada por FURNAS (1997). Na tabela 3.2, pode-se observar a influência do plano de cura na retração por secagem de concretos convencionais.

Tabela 3.2 – Influência do plano de cura na retração por secagem (FURNAS, 1997)

Agregado/ Dmáx	Plano de Cura (dias)*	Relação a/c	Retração ($\times 10^{-6}$) Idade (dias)					
			14	28	90	180	360	500
Quartzito 19mm	28	0,592	-	-55	55	158	250	308
	14		-23	-15	40	200	310	445

* Cura por imersão em água saturada com cal

MEHTA & MONTEIRO (1994) citam que à umidade relativa de 100%, admite-se que a retração por secagem seja zero; aumentando-se para cerca de 200×10^{-6} à umidade relativa de 80 por cento e 400×10^{-6} à umidade relativa de 45 por cento.

Segundo NEVILLE (1997), as propriedades do cimento tem pequena influência sobre a retração do concreto; não se acredita que a composição química do cimento tenha influência na retração, exceto no caso dos cimentos com deficiência de gesso. FURNAS (1997) cita que, em geral, cimentos mais finos, pozolânicos ou com adição de escória tem tendência a aumentar a retração, mas o efeito varia consideravelmente com o tipo de agregado.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), as adições e aditivos para o concreto tais como cloreto de cálcio, escória granulada e pozolanas tendem a aumentar o volume de poros finos no produto da hidratação do cimento. Sendo a retração por secagem associada diretamente com a água contida em pequenos poros, os concretos contendo adições capazes de refinar os poros normalmente apresentam valores superiores para a retração por secagem. Aditivos redutores de água e retardadores de pega também levam a um refinamento dos poros.

A geometria do elemento de concreto influencia na retração por secagem. Com a umidade relativa constante, tanto o tamanho quanto à forma da peça de concreto determinam a magnitude da retração por

secagem; a taxa de perda de água seria controlada pelo comprimento do caminho percorrido pela água, que está sendo expelida durante a retração por secagem (MEHTA & MONTEIRO, 1994). A retração diminui com o aumento das dimensões; a forma das peças também parece ter influência, mas, como primeira aproximação, a retração pode ser considerada como uma função da relação volume/área da peça (FURNAS, 1997).

3.2.2. COMO MINIMIZAR A RETRAÇÃO POR SECAGEM

Segundo NEVILLE (1997), o meio eficaz de impedir a retração plástica consiste em manter baixa a velocidade de evaporação da água pela superfície do concreto. MEHTA & MONTEIRO (1994) citam algumas medidas de prevenção que devem ser tomadas para evitar a fissuração por retração plástica quando a taxa de evaporação exceder 1kg/m^2 por hora; tais medidas são descritas abaixo:

- Umedecimento da sub-base e das fôrmas.
- Umedecimento dos agregados quando estes absorverem grande quantidade de água.
- Reduzir a velocidade do vento sobre a superfície do concreto através da construção de quebra-vento temporário.
- Construção de brise para reduzir a temperatura na superfície do concreto.
- Manter baixa a temperatura do concreto fresco.
- Proteger o concreto temporariamente, com mantas, durante qualquer demora apreciável entre lançamento e acabamento.
- Reduzir o tempo entre lançamento e início de cura.

- Minimizar a evaporação, protegendo o concreto logo após o acabamento pelo uso de sacos de aniagem saturados, espargimento de água, etc.

Com relação à retração por secagem no estado endurecido, SILVA & PITTA (2000) citam um aditivo redutor de retração. É um aditivo de baixa viscosidade, solúvel em água, o qual age reduzindo a tensão capilar que se desenvolve dentro dos poros do concreto e, como consequência, reduz a retração por secagem.

NEVILLE (1997) cita a utilização de cimentos expansivos que, na hidratação, reduzem a deformação induzida pela retração. O uso de tais cimentos não impede a fissuração, mas a retarda uma vez que a expansão nas primeiras idades compensa aproximadamente a retração normal subsequente. Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994) deve-se proporcionar a cura úmida contínua por pelo menos sete dias após o lançamento, de modo que a expansão se desenvolva para compensar a subsequente retração por secagem. Na Figura 3.1, observa-se uma comparação entre o concreto com cimento Portland e o concreto com cimento expansivo, isto é, o concreto com retração compensada.

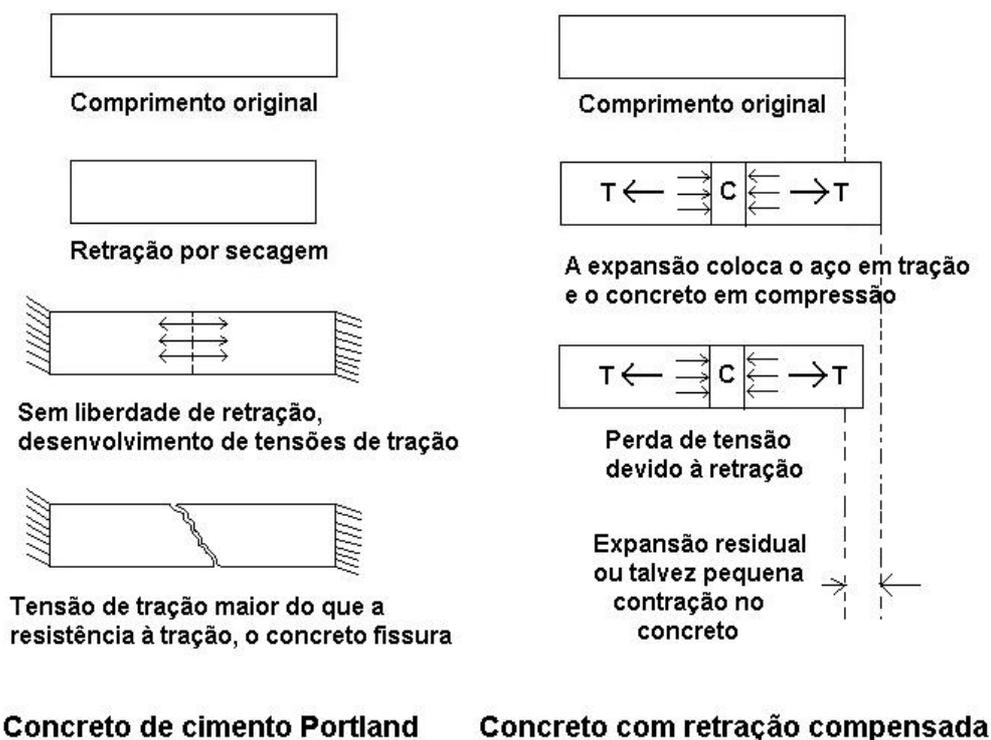


Figura 3.1 – Comparação entre o concreto de cimento Portland e o concreto com retração compensada

Segundo NEVILLE (1997) embora sejam mais caros do que os cimentos Portland, os cimentos expansivos são muito úteis em estruturas de concreto nas quais é importante uma redução na fissuração (pontes, placas de pavimentos, reservatórios, coberturas e digestores de esgotos).

3.2.3. RETRAÇÃO POR SECAGEM – CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Os agregados reciclados de resíduos de concreto possuem algumas diferenças entre suas propriedades e a dos agregados naturais, estas estão principalmente relacionadas à quantidade de argamassa do concreto original aderida à superfície dos mesmos. Esta camada de argamassa é responsável pela elevada absorção do agregado reciclado em comparação com a absorção do agregado natural; para uma determinada consistência, é

necessário aumentar a relação água/cimento em virtude da absorção do agregado reciclado.

Para uma dada consistência, o aumento da relação água/cimento para concretos reciclados quando comparamos com concretos convencionais acaba sendo fundamental na retração por secagem. NEVILLE (1997) relata que a retração é tanto maior quanto maior for à relação água/cimento, pois esta determina a quantidade de água evaporável na pasta de cimento e a velocidade à qual a água pode se deslocar para a superfície do concreto. Segundo CARLSON³ apud FURNAS (1997), a cada acréscimo de 1% na água de amassamento de um concreto aumentará a retração em torno de 2%. A explicação parece ser que para cada 1% de acréscimo de água o volume de gel a se formar no concreto é aumentado de quase 1%, ao mesmo tempo, que a tendência à retração do gel é aumentada cerca de 1% pela água extra.

Segundo NEVILLE (1997), os agregados leves, de um modo geral, apresentam maiores deformações por retração, principalmente devido ao fato de o agregado, tendo um módulo de elasticidade menor, oferece menor contenção à retração da pasta de cimento. Um agregado com alto valor de módulo de elasticidade têm uma maior capacidade de restringir variações de volume da matriz e, com isso, apresentar menor retração.

HANSEN (1985) cita que devido a grande quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado reciclado, a retração por secagem do concreto com agregados reciclados apresentou-se sempre maior do que a

³ CARLSON, R. W. (1938). Drying Shrinkage of Concrete as Concrete as Affected by Many Factors. Philadelphia – USA, ASTM Proceedings, 1938, p. 419-440 apud FURNAS (1997). Concretos (massa, estrutural, projetado e compactado com rolo) – Ensaio e Propriedades. Editora Pini, São Paulo, 1997.

retração do concreto com agregados naturais. Esse aumento situou-se entre 40 e 80%, sendo que os maiores valores foram encontrados quando se utilizou a fração miúda e a graúda reciclada.

BOEGH & HANSEN (1985) avaliaram o módulo de elasticidade e a retração por secagem de concretos confeccionados com agregados graúdos reciclados de concreto. Foi observado um aumento de 40 a 60% da retração por secagem para o concreto reciclado em comparação com o concreto com agregados naturais.

A retração por secagem dos concretos com agregados graúdos reciclados é cerca de 55% maior do que a retração do concreto com agregados naturais. Para concretos com agregados graúdos e miúdos reciclados, a retração por secagem é cerca de duas vezes o valor da retração para o concreto natural (RAVINDRARAJAH et al., 1987).

ALEXANDER (1996) analisou a influência de 23 tipos de agregados graúdos nas propriedades dos concretos. Sua conclusão foi que os agregados podem exercer uma importante influência nas propriedades do concreto endurecido. Em particular, as propriedades de deformação do concreto são afetadas pelo agregado através de uma combinação de fatores, tais como, demanda de água, rigidez do agregado e interação pasta/agregado.

KIM & LEE (1998) avaliaram a distribuição não-uniforme de umidade numa seção transversal de concreto que ocasiona uma retração por secagem diferencial e, além disso, provoca uma variação nas propriedades do material; tais como, módulo de elasticidade e coeficiente de fluência. Para esse tipo de retração, tensões de tração podem ocorrer na superfície de concreto exposta resultando na formação de fissuras.

Os pesquisadores após a realização de ensaios de retração por secagem com espécimes de concreto que foram seladas, isto é, permitindo

a difusão de umidade apenas uniaxialmente chegaram às seguintes conclusões:

- A deformação interna causada pela retração por secagem difere significativamente de acordo com a distância à superfície exposta; a deformação por retração é maior para regiões próximas a superfície exposta do que para as regiões internas.
- Nas regiões internas a deformação por retração é lenta e, difere das regiões próximas à superfície aonde a deformação por secagem já é significativa nas primeiras idades.

TERANISHI et al. (1998) estabeleceram várias dosagens para concretos com agregados graúdos reciclados. Os resultados evidenciaram que a retração por secagem de concretos com agregados graúdos reciclados foi cerca de 30% maior para concretos com relação água/cimento igual a 0,6, 25% superior para uma relação água/cimento igual a 0,5 e cerca de 17% maior para concretos com uma relação água/cimento igual a 0,4 se comparado com a retração por secagem de concretos com agregados naturais com características similares.

DE PAUW et al. (1998) estudaram a retração por secagem de três materiais reciclados e compararam com os resultados obtidos para um material leve e um material de origem calcárea. Foram definidas três dosagens: concreto com 300 kg/m³ de cimento; concreto com 350 kg/m³ de cimento e concreto com 300 kg/m³ de cimento + superplastificante.

Os pesquisadores observaram que a deformação nas primeiras idades é maior para os concretos confeccionados com o agregado graúdo calcáreo; nesse período, a retração é menor para o concreto leve quando comparada com os demais concretos. Depois de um mês e meio, a declividade da curva de retração para o concreto com calcáreo apresentou uma certa diminuição na sua declividade, enquanto a curva para os outros concretos manteve sua declividade. Decorridos três meses, a retração dos

concretos reciclados tornou-se superior aos demais concretos e essa tendência continuou após um ano. De certa forma os concretos com consumo de cimento igual a 300 kg/m³ e uso de superplastificante apresentaram menor retração.

Os valores experimentais encontrados para a deformação por retração foram comparados com as formulações do Model Code 90. As comparações apresentaram certas discordâncias, pois a formulação do Model Code 90 não leva em consideração as características do agregado como porosidade e sua relação com o comportamento da retração e fluência.

SAGOE-CRENTSIL et al. (2001) estudaram a retração por secagem de concretos com agregados graúdos reciclados. Para concretos reciclados com cimento de escória de alto forno, a deformação por retração foi cerca de 35% maior se comparado com o concreto de referência. Por outro lado, para concretos reciclados confeccionados com cimento Portland, a retração por secagem é apenas 15% maior se comparada com o concreto de referência. De uma forma geral, os autores concluíram que os concretos reciclados apresentaram maiores valores de retração, devido às partículas de agregado reciclado terem menor capacidade de restrição se comparado com os agregados naturais.

POON et al. (2002) avaliaram a retração por secagem de blocos de concreto e pavimentação que empregaram agregados reciclados. Os resultados podem ser encontrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Resultados de retração por secagem para blocos de concreto e pavimentação (POON et al., 2002).

Dosagem	Retração por Secagem (%)					
	Blocos de Concreto	Relação Rec/Ref	Blocos de pavim. s/ cinza	Relação Rec/Ref	Blocos de pavim. c/cinza	Relação Rec/Ref
Referência	0,040	1,00	0,027	1,00	0,026	1,00
25% reciclados	0,042	1,05	-	-	0,026	1,00
50% reciclados	0,044	1,10	0,030	1,11	0,029	1,12
75% reciclados	0,046	1,15	-	-	0,034	1,31
100% reciclados	0,052	1,30	0,038	1,41	0,036	1,38

De maneira geral, as dosagens que empregaram 100% de reciclados (gráudo+miúdo) apresentaram uma retração cerca de 35% superior à obtida para o concreto de referência. De acordo com a BS 6073, que prescreve uma retração menor que 0,06% para blocos, os blocos de concreto com reciclados poderiam ser especificados sem nenhum inconveniente.

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

4

Capítulo

Os materiais empregados nesta pesquisa para a confecção dos concretos estudados foram:

1. Cimento Portland;
2. Agregado miúdo natural;
3. Agregado miúdo reciclado (ensaio de granulometria);
4. Agregado graúdo reciclado;
5. Agregado graúdo natural;

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados seguindo as recomendações das Normas Brasileiras, no laboratório de Estruturas de Concreto do Departamento de Estruturas e no laboratório do Departamento de Transportes, ambos da EESC – USP.

Todos os materiais foram obtidos na praça ou através do próprio fabricante. No caso do cimento, seguiu-se a recomendação para estocagem dos sacos e obediência aos prazos de validade.

4.1. AGLOMERANTE

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o cimento CII-E-32, cujas características físicas e mecânicas devem obedecer às recomendações da NBR 5732/88. Segundo esta norma, os teores das adições permitidas devem estar compreendidos entre os limites fixados na Tabela 4.1, em relação à massa total do aglomerante.

Tabela 4.1 – Teores dos componentes do Cimento Portland com Escória – NBR-5732

Sigla	Classe	Clínquer + Sulfato de Cálcio	Escória	Material Pozolânico	Material Carbonático
CPE	32	100-85	≤10	0	≤5

As exigências químicas prescritas pela NBR-5732 são encontradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Exigências químicas prescritas para o Cimento Portland com Escória – NBR 5732

Determinações	Limitações em %
Resíduo insolúvel	≤1,5
Perda de fogo	≤4,5
Óxido de Magnésio (MgO)	≤6,5
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	≤4,0

Com relação às exigências físicas e mecânicas para o cimento Portland com escória, os dados fornecidos pelo fabricante HOLCIM (2003) e os prescritos pela NBR 5732 são confrontados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Exigências físicas e mecânicas (HOLCIM, 2003 e NBR 5732)

Características e propriedades		Unidade	NBR 5732	HOLCIM (2003)
Finura	Resíduo na peneira 0,075mm	%	≤12	10
	Área específica	M ² /kg	≥260	330
Tempo de início de pega		h	≥1	2h30'
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥10	18
	7 dias de idade	MPa	≥20	26
	28 dias de idade	MPa	≥32	36

4.2. AGREGADO MIÚDO NATURAL

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural quartzosa obtida do Rio Mogi-Guaçu, adquirida na região de São Carlos – SP. Pela classificação granulométrica, realizada conforme a NBR-7211, foi classificada como sendo Areia Média - zona 3. As porcentagens retidas e acumuladas podem ser visualizadas na Tabela 4.4 e a curva granulométrica com os limites da NBR-7211 encontram-se na Figura 4.1.

Tabela 4.4 – Composição granulométrica do agregado miúdo natural – NBR 7217/87

Peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada
6,30	0	0
4,80	1	1
2,40	2	3
1,20	17	20
0,60	31	51
0,30	30	81
0,15	16	97
Resíduo	3	100

Dimensão Máxima Característica = 2,40 mm
Módulo de Finura = 2,53

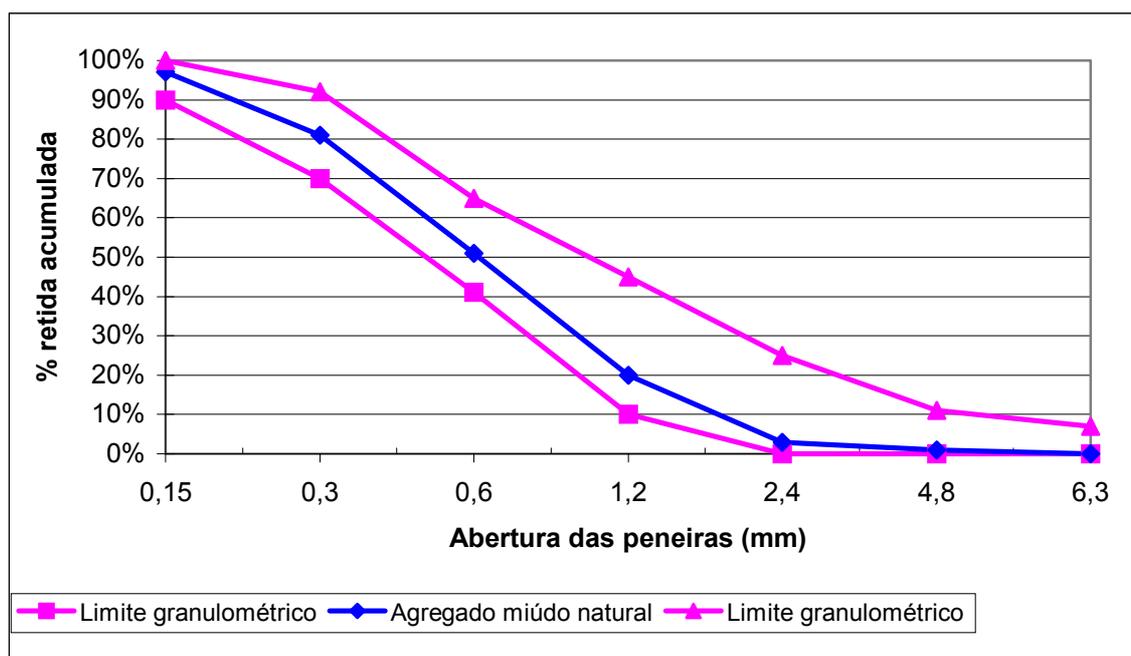


Figura 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural

4.3. AGREGADO GRAÚDO NATURAL

O agregado graúdo natural empregado foi a pedra britada de origem basáltica, da região de Araraquara – SP. As porcentagens retidas e acumuladas são encontradas na Tabela 4.5 e a curva granulométrica, na Figura 4.2.

Tabela 4.5 – Composição granulométrica do agregado graúdo natural – NBR 7217/87

Peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada
25,0	0	0
19,0	3	3
12,5	38	41
9,5	35	76
6,3	17	93
4,8	2	95
Resíduo	5	100

Dimensão Máxima Característica = 19,0 mm
Módulo de Finura = 6,74

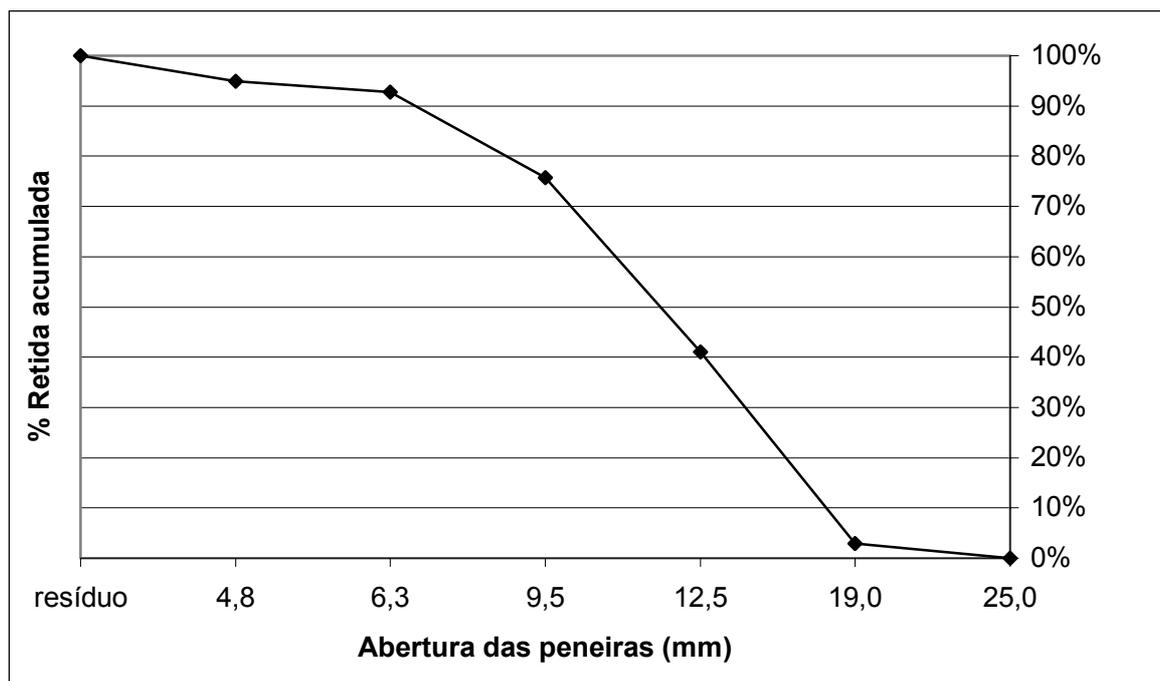


Figura 4.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural

As demais propriedades físicas do agregado graúdo natural encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Propriedades físicas do agregado graúdo natural

Propriedade	Resultado	Norma
Massa unitária – estado solto	1,505 kg/dm ³	NBR 7251/82
Massa unitária – estado compactado seco	1,666 kg/dm ³	NBR 7810/83
Abrasão Los Angeles	20,52%	NBR 6465/84
Massa específica na condição seca	2,816 kg/dm ³	NBR 9937/87
Massa específica na condição saturada superfície seca	2,872 kg/dm ³	NBR 9937/87
Índice de vazios	5,52%	NBR 9778/87
Absorção de água		
10 min.	1,24%	NBR 9937/87
30 min.	1,37%	
24 horas	1,96%	

4.4. AGREGADO MIÚDO RECICLADO

O agregado miúdo reciclado foi proveniente dos resíduos de concreto natural de referência, que depois de triturados em um britador de mandíbulas do Departamento de Geotecnia da EESC-USP foram peneirados e separados.

A análise granulométrica foi o único ensaio realizado com o agregado miúdo reciclado, uma vez que este material não foi utilizado em nenhuma das dosagens da pesquisa. O ensaio foi realizado para verificar possíveis diferenças existentes nas granulometrias dos reciclados, em virtude das diferentes idades de reciclagem.

Os agregados miúdos reciclados foram designados pelas seguintes terminologias:

- MR1 – agregado miúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi britado com a idade de um dia.
- MR7 – agregado miúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi britado com a idade de sete dias.
- MR28 – agregado miúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi britado com a idade de vinte e oito dias.
- MRNA28 – agregado miúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto não-adensado, o qual foi britado depois de vinte e oito dias decorridos da moldagem.

As porcentagens retidas e acumuladas podem ser encontradas na Tabela 4.7. As siglas D.M e MF referem-se respectivamente a dimensão máxima característica e módulo de finura.

Tabela 4.7 – Composições granulométricas dos agregados miúdos reciclados analisados

Peneira (mm)	MR1		MR7		MR28		MRNA28		
	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	
6,30	0	0	0	0	0	0	0	0	
4,80	2	2	1	1	1	1	2	2	
2,40	43	45	38	39	39	40	50	52	
1,20	25	70	25	64	24	64	22	74	
0,60	15	85	15	79	15	79	12	86	
0,30	9	94	10	89	11	90	8	94	
0,15	3	96	5	95	5	95	3	97	
Resíduo	4	100	5	100	5	100	3	100	
		D.M = 4,80 mm							
		MF = 3,92		MF = 3,67		MF = 3,69		MF = 4,05	

4.5. AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

O agregado graúdo reciclado foi proveniente de resíduos de concreto natural de referência, que após serem triturados em um britador de mandíbulas do Departamento de Geotecnia da EESC – USP e peneirados, forneceram o material necessário para as dosagens.

Os agregados graúdos reciclados foram designados pelas seguintes terminologias:

- GR1 – agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi britado com a idade de um dia.
- GR7 – agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi britado com a idade de sete dias.

- GR28 – agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto, o qual foi britado com a idade de vinte e oito dias.
- GRNA28 – agregado graúdo reciclado proveniente de um resíduo de concreto não-adensado, o qual foi britado depois de vinte e oito dias decorridos da moldagem.

As propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados foram objeto de estudo desta pesquisa, portanto, os resultados e análises serão encontrados nos itens subseqüentes deste trabalho.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

5

Capítulo

5.1. METODOLOGIA

A metodologia empregada nos ensaios baseou-se nas recomendações das Normas Brasileiras, e quando não disponíveis, foram baseadas em Normas Americanas ou artigos publicados em revistas científicas.

A pesquisa experimental foi dividida em duas etapas. A Primeira Fase consistiu em uma análise sobre a influência do período decorrido entre a moldagem e a reciclagem do concreto nas propriedades físicas dos agregados reciclados e nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos com esses agregados.

Na Segunda Fase, foi estudada a retração por secagem de prismas confeccionados com agregados graúdos reciclados. Nessa etapa foram utilizados os mesmos traços definidos para a primeira fase.

Deve-se salientar que todos os resultados obtidos para os agregados reciclados e para os concretos reciclados foram comparados com os resultados obtidos para os agregados naturais e para os concretos confeccionados com esses agregados.

5.1.1. TRAÇO EMPREGADO

Os traços utilizados para todas as dosagens (concreto natural e concreto reciclado) foram iguais, variando somente a natureza do agregado graúdo e a idade do agregado reciclado. Foi escolhido como parâmetro de controle o abatimento de tronco de cone, portanto cada traço teve uma relação água/cimento em função do mesmo resultado de abatimento.

O traço utilizado foi semelhante ao empregado por GONÇALVES (2000). Este traço, em massa, para o concreto com agregados naturais possui a seguinte composição:

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

O agregado miúdo reciclado não foi utilizado nas dosagens devido sua elevada absorção e variabilidade, sendo apenas avaliada a sua granulometria. Além disso, inúmeros artigos científicos e recomendações técnicas sugerem a não utilização desse agregado.

Foram definidas cinco dosagens, sendo que quatro delas utilizavam agregados graúdos reciclados. As dosagens com agregados graúdos reciclados diferiam entre si pela idade de reciclagem, como por exemplo, na dosagem 3, o agregado graúdo reciclado (GR7) foi obtido de um concreto que foi reciclado após decorridos sete dias da sua moldagem; na dosagem 5, o agregado graúdo reciclado (GRNA28) foi obtido de um concreto não-adensado que foi reciclado 28 dias após a sua moldagem. As dosagens utilizadas são encontradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dosagens utilizadas na pesquisa

Dosagem	Composição
1 - Concreto natural – referência	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – brita 1
2 - Concreto reciclado (CR1)	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado (GR1)
3 - Concreto reciclado (CR7)	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado (GR7)
4 - Concreto reciclado (CR28)	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado (GR28)
5 - Concreto reciclado (CRNA28)	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado (GRNA28)

Os agregados reciclados foram obtidos através da britagem de corpos-de-prova de concreto. Os corpos-de-prova foram moldados no laboratório e permaneceram na câmara úmida até a data de reciclagem, com exceção do concreto de referência que deu origem ao agregado reciclado GR1, o qual foi reciclado logo após a desforma.

5.1.2. PROCESSO PRODUTIVO

Durante a pesquisa, adotou-se uma seqüência específica de colocação dos componentes na betoneira e também se obedeceu determinados tempos de mistura, Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura

Lançamento	Materiais	Tempo de mistura
1º	Agregado graúdo + Parte da água	1 minuto
2º	Cimento + Agregado miúdo	1 minuto
3º	Restante da água	1 minuto

A colocação do agregado graúdo juntamente com parte da água é importante para que este absorva parte dessa água, especialmente no caso dos agregados reciclados que apresentam elevada absorção.

Os componentes foram misturados numa betoneira horizontal de capacidade nominal igual a 210 litros. A betoneira pode ser visualizada na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Betoneira utilizada na pesquisa

Após a mistura, procedeu-se a moldagem e adensamento conforme a NBR-5738 – Moldagem e Cura de Corpos-de-prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto. Após 24 horas, todos os exemplares foram desmoldados e submetidos à cura na câmara úmida de acordo com a data de reciclagem prevista para os concretos com agregados naturais ou até a data dos ensaios (7 ou 28 dias) no caso dos concretos com agregados reciclados.

5.2. PRIMEIRA FASE DA PESQUISA

A primeira fase caracterizou-se pela análise das propriedades físicas dos agregados reciclados e das propriedades físicas e mecânicas dos concretos confeccionados com esses agregados. Nesta etapa, verificou-se a influência do período decorrido entre a moldagem e a reciclagem do concreto nas propriedades dos materiais reciclados. Em todos os ensaios, os resultados obtidos para os agregados naturais e para os concretos confeccionados com esses agregados serviram como parâmetro de comparação.

5.2.1. CARACTERÍSTICAS DA PRIMEIRA FASE

Inicialmente foi realizado um ensaio piloto visando determinar a quantidade de corpos-de-prova necessários para fornecer o material reciclado (agregado graúdo). Este material deveria ser suficiente para que fossem realizados os ensaios de caracterização e posteriormente, os ensaios referentes ao concreto fresco e endurecido.

HANSEN (1985) cita em seu trabalho que após terem sido realizadas a britagem de peças de concreto, constatou-se que a fração graúda ficava em torno de 70% do total dependendo da regulagem do britador. Para obter melhor precisão em relação a esse valor, foram moldados três corpos-de-provas (150 x 300) e após a britagem e peneiramento, verificou-se que a fração graúda representava cerca de 70% do total, ou seja, semelhante à apresentada pela bibliografia. A partir desse índice, determinou-se a quantidade necessária de corpos-de-prova que após a reciclagem forneceriam o material reciclado (GR1, GR7, GR28 e GRNA28).

Para a análise das propriedades físicas dos agregados reciclados foram moldados os seguintes corpos-de-provas de referência:

- 6 corpos-de-prova (150x300) – forneceram o agregado reciclado GR1
- 6 corpos-de-prova (150x300) – forneceram o agregado reciclado GR7
- 6 corpos-de-prova (150x300) – forneceram o agregado reciclado GR28
- 6 corpos-de-prova (150x300) – forneceram o agregado reciclado GRNA28

Após 24 horas, todos esses exemplares foram desmoldados e submetidos ao processo de cura úmida até a data estabelecida para a reciclagem. Logo após a desforma, 25% dos corpos-de-prova (6 CPs) foram britados fornecendo o agregado graúdo reciclado (GR1); esse mesmo procedimento foi efetuado para os demais exemplares dependendo da data estabelecida para a reciclagem (7 ou 28 dias).

Para a análise das propriedades físicas e mecânicas dos concretos reciclados foram moldados novos corpos-de-provas com agregados naturais. O número de exemplares necessários foi:

- 9 corpos-de-prova (150x300) – forneceram o agregado reciclado GR1
- 9 corpos-de-prova (150x300) – forneceram o agregado reciclado GR7
- 9 corpos-de-prova (150x300) – forneceram o agregado reciclado GR28
- 9 corpos-de-prova (150x300) – forneceram o agregado reciclado GRNA28

Após 24 horas, todos os exemplares foram desmoldados e submetidos ao processo de cura úmida até a data de reciclagem. Logo após a desforma, 25% dos corpos-de-provas foram reciclados fornecendo o agregado graúdo reciclado (GR1); esse mesmo procedimento foi efetuado para os demais exemplares dependendo da data estabelecida para a reciclagem (GR7 – 7 dias, GR28 e GRNA28 – 28 dias).

Os agregados reciclados foram estocados em caixas até a data de confecção dos concretos. Os concretos com agregados reciclados foram moldados após decorridos um ou dois dias de efetuada a reciclagem, evitando-se dessa forma a estocagem do material por longo período de tempo o que poderia provocar prejuízos aos objetivos desta pesquisa.

5.2.2. RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA FASE

5.2.2.1 – AGREGADOS

Neste item, serão apresentados os resultados obtidos para as propriedades físicas dos agregados analisados nesta pesquisa.

Os principais ensaios normalizados utilizados para a caracterização destes agregados são encontrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Ensaio referentes aos agregados

Norma	Propriedade
NBR – 7211/83	Agregado para concreto
NBR – 7217/87	Agregados – Determinação da composição granulométrica
NBR - 6465/84	Agregados – Determinação da Abrasão “ Los Angeles”
NBR- 9937/87	Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo
NBR – 7251/82	Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária
NBR – 7810/83	Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária

Os agregados reciclados (GR1, GR7, GR28 e GRNA28) foram provenientes de um concreto confeccionado com agregados naturais e que apresentava as características mecânicas indicadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas do concreto original – referência

f_{c1} (Mpa)	f_{c7} (MPa)	f_{c28} (MPa)	Módulo de deformação secante (GPa)
14,6	45,3	52,1	36,07

Após a britagem, os agregados reciclados passaram pela peneira 4,8 mm visando separar a fração graúda da miúda; deve-se salientar que esta fração miúda obtida após o processo de peneiramento não foi utilizada em nenhuma das dosagens. Na Tabela 5.5, encontram-se as porcentagens de agregados graúdos e miúdos obtidas para cada agregado reciclado.

Tabela 5.5 – Porcentagens de agregados graúdos e miúdos para cada agregado reciclado

Agregado Reciclado	% Agregados graúdos	% Agregados miúdos
R1	69,9% (GR1)	30,1% (MR1)
R7	74,8% (GR7)	25,2% (MR7)
R28	74,0% (GR28)	26,0% (MR28)
RNA28	73,6% (GRNA28)	26,4% (MRNA28)

As porcentagens retidas e acumuladas para cada agregado reciclado podem ser encontradas na Tabela 5.6. As siglas D.M e MF referem-se respectivamente à dimensão máxima característica e ao módulo de finura.

Tabela 5.6 – Composições granulométricas dos agregados graúdos reciclados

Peneira (mm)	GR1		GR7		GR28		GRNA28		
	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	
25,0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19,0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12,5	6	6	6	6	6	6	9	9	
9,50	41	47	37	43	40	46	43	51	
6,30	40	87	39	83	38	84	34	85	
4,80	11	98	14	97	13	97	11	97	
Resíduo	2	100	3	100	3	100	3	100	
		D.M = 19,0mm							
		MF = 6,45		MF = 6,40		MF = 6,43		MF = 6,48	

As demais propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados encontram-se na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Propriedades físicas dos agregados graúdos reciclados

Propriedade	Resultado				Norma
	GR1	GR7	GR28	GRNA28	
Massa unitária – estado solto (kg/dm ³)	1,287	1,287	1,293	1,258	NBR 7251/82
Massa unitária – estado compactado seco (kg/dm ³)	1,437	1,426	1,424	1,411	NBR 7810/83
Abrasão Los Angeles (%)	41,68	30,48	28,76	31,08	NBR 6465/84
Massa específica na condição seca - γ_s (kg/dm ³)	2,455	2,398	2,426	2,393	NBR 9937/87
Massa específica na condição saturada superfície seca - γ_{sss} (kg/dm ³)	2,589	2,552	2,575	2,542	NBR 9937/87
Índice de vazios (%)	13,46	15,38	14,93	14,94	NBR 9778/87
Absorção de água (%)					
10 min.	4,74	5,67	5,51	5,59	NBR 9937/87
30 min.	4,84	5,81	5,68	5,66	
24 horas	5,48	6,41	6,16	6,25	

Na Figura 5.2, pode ser observada a máquina “Los Angeles” utilizada para a realização do ensaio de abrasão.



Figura 5.2 – Máquina “Los Angeles” (Departamento de Transportes)

5.2.2.2 – CONCRETO

Neste item serão apresentados os resultados obtidos para o concreto natural e para o concreto reciclado no estado fresco e endurecido.

Os principais ensaios normalizados são encontrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Ensaio referentes ao concreto fresco e endurecido

Norma	Propriedade
NBR 5738/94	Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos
NBR 7223/92	Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone
NBR 5739/94	Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto
NBR 7222/83	Argamassas e Concretos – Determinação da resistência à tração por compressão diametral
NBR 8522/84	Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação
NBR 9833/87	Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico
NBR 9778/87	Argamassa e Concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica

As dosagens utilizadas na pesquisa são encontradas na Tabela 5.1. O consumo teórico de cimento por metro cúbico de concreto e o teor de argamassa para cada dosagem podem ser calculados através de fórmulas teóricas obtidas de HELENE & TERZIAN (1993):

Consumo de cimento teórico:

$$C = \frac{1000}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + \frac{a}{c} \right)} \quad (5.1)$$

Teor de argamassa seca:

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + a + p)} \quad (5.2)$$

As massas específicas dos materiais utilizados podem ser encontradas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Massa específica dos materiais utilizados na pesquisa

Material	Massa específica (kg/dm³)
Cimento – CII E – 32	3,12
Agregado graúdo natural	2,82
Agregado miúdo natural	2,68
Agregado graúdo reciclado – GR1	2,46
Agregado graúdo reciclado – GR7	2,40
Agregado graúdo reciclado – GR28	2,43
Agregado graúdo reciclado – GRNA28	2,39

Na Tabela 5.10, podem ser encontrados o consumo teórico de cimento e o teor de argamassa seca para cada dosagem utilizada.

Tabela 5.10 – Consumo teórico de cimento e teor de argamassa seca

Dosagem	Consumo teórico de cimento (kg/m^3)	Teor de argamassa seca (%)
1 – Referência	475	50
2 – CR1	441	50
3 – CR7	430	50
4 – CR28	438	50
5 – CRNA28	430	50

Para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação, foi utilizada uma prensa hidráulica da marca ELE e modelo Autotest 2000, com capacidade de 2000KN, Figura 5.3.



Figura 5.3 – Prensa hidráulica utilizada nos ensaios

No ensaio de módulo de deformação, também foram utilizados um sistema computadorizado de aquisição de dados System 5000 e extensômetros elétricos, Figuras 5.4 e 5.5.

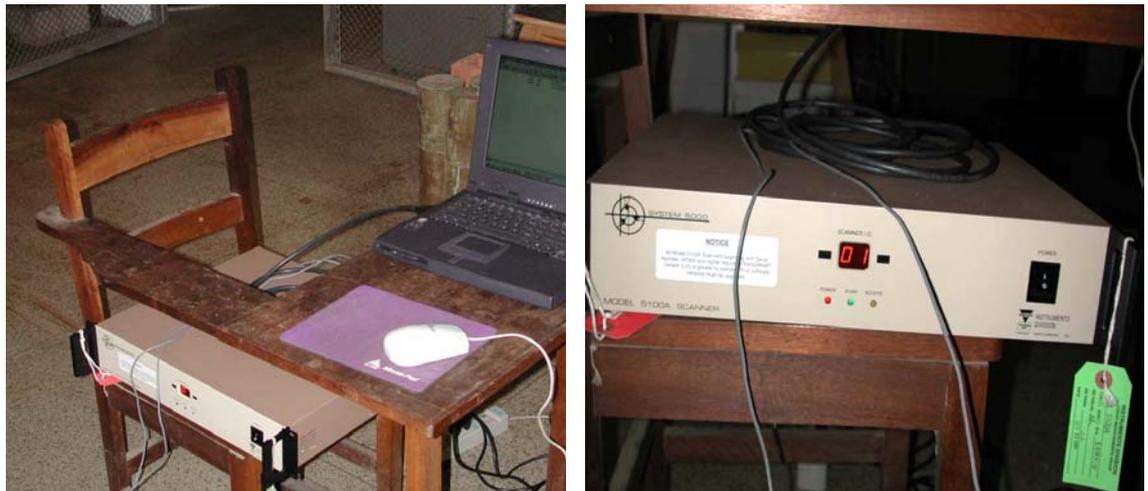


Figura 5.4 – Sistema de aquisição de dados – Ensaio de módulo de deformação



Figura 5.5 – Extensômetros elétricos posicionados no corpo-de-prova

O ensaio de módulo de deformação foi realizado em corpos-de-prova de dimensões (100x200). Adotou-se um incremento de carga com valor de 25KN, onde a leitura das deformações começou com a carga de 25KN e terminou com 250KN, que é aproximadamente 70% da carga de ruptura. Foi escolhido o módulo de deformação secante, que têm como intervalo de tensão o valor inicial de 0,5MPa e o valor final de 40% da carga de ruptura.

O módulo de deformação secante foi calculado pela seguinte expressão:

$$E_{\text{sec, n}} = \frac{\sigma_n - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_n - \varepsilon_0} \quad (5.3)$$

onde:

$\sigma_{\text{inf}} = 0,5\text{MPa}$

$\sigma_n =$ quarenta por cento da tensão de ruptura do concreto

$\varepsilon_0 =$ deformação referente à tensão de 0,5MPa

$\varepsilon_n =$ deformação referente à tensão σ_n

A – CONCRETO COM AGREGADOS NATURAIS - REFERÊNCIA

A.1 – CONCRETO FRESCO

Para a dosagem com agregados naturais, os ensaios realizados com o concreto no estado fresco forneceram os seguintes resultados, Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Resultados dos ensaios para o concreto de referência no estado fresco

Propriedade	Resultado
Abatimento do tronco de cone	60 mm
Massa específica (γ_{cf})	2,49 kg/dm ³
Consumo real de cimento	478 kg/m ³

Para as demais dosagens, foi realizado um ensaio piloto visando determinar a relação água/cimento necessária para obter o mesmo abatimento do concreto com agregados naturais. As dosagens deveriam apresentar um abatimento situado entre 60 ± 10 mm.

A.2 – CONCRETO ENDURECIDO

Para a caracterização do concreto no estado endurecido foram utilizados três corpos-de-prova (100x200). Na Tabela 5.12, encontra-se a média dos resultados para cada propriedade estudada.

Tabela 5.12 – Propriedades do concreto de referência no estado endurecido

Propriedade	Resultado
Absorção de água por imersão	4,65%
Índice de vazios	11,17%
Massa específica amostra seca	2,406 kg/dm ³
Massa específica amostra saturada	2,517 kg/dm ³

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral são apresentados nas Tabelas 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13 – Resistência à compressão – Concreto com agregados naturais

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	1	17,27	17,1	0,35
2	1	16,66		
3	1	17,25		
4	7	38,10	36,4	1,56
5	7	35,91		
6	7	35,07		
7	28	42,80	44,5	4,19
8	28	37,86		
9	28	45,09		
10	28	47,68		
11	28	43,52		
12	28	49,93		

Tabela 5.14 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto com agregados naturais

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{tj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	1	1,46	1,6	0,16
2	1	1,75		
3	1	1,51		
4	7	2,72	2,7	0,47
5	7	3,13		
6	7	2,19		
7	28	3,45	3,3	0,17
8	28	3,21		

Os ensaios de módulo de deformação foram realizados aos 28 dias, os resultados para os três corpos-de-prova são apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Módulo de deformação secante para o concreto com agregados naturais

Nº Cp	f_{c28} (MPa)	E_{sec} (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
1	47,68	36,94	35,5	1,51
2	43,52	33,93		
3	49,93	35,48		

B – CONCRETO RECICLADO – CR1

B.1 – CONCRETO FRESCO

Na dosagem com o concreto reciclado CR1, devido à maior absorção do agregado reciclado foi necessário aumentar a relação água/cimento para 0,45 visando obter o mesmo valor de abatimento do concreto de referência. Os ensaios realizados com o concreto no estado fresco forneceram os seguintes resultados, Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Resultados dos ensaios para o concreto reciclado CR1 no estado fresco

Propriedade	Resultado
Abatimento do tronco de cone	50 mm
Massa específica (γ_{cf})	2,39 kg/dm ³
Consumo real de cimento	455 kg/m ³

B.2 – CONCRETO ENDURECIDO

Para a caracterização do concreto no estado endurecido foram utilizados três corpos-de-prova (100x200). Na Tabela 5.17, encontra-se a média dos resultados para cada propriedade estudada.

Tabela 5.17 – Propriedades do concreto reciclado CR1 no estado endurecido

Propriedade	Resultado
Absorção de água por imersão	6,01 %
Índice de vazios	13,60 %
Massa específica amostra seca	2,262 kg/dm ³
Massa específica amostra saturada	2,398 kg/dm ³

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral são apresentados nas Tabelas 5.18 e 5.19.

Tabela 5.18 – Resistência à compressão – Concreto reciclado CR1

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	39,61	39,3	0,36
2	7	38,92		
3	7	39,41		
4	28	47,32	47,7	1,44
5	28	49,98		
6	28	46,69		
7	28	49,50		
8	28	46,20		

Tabela 5.19 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto reciclado CR1

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{tj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	2,85	2,9	0,46
2	7	2,50		
3	7	3,41		
4	28	3,51	3,4	0,39
5	28	3,50		
6	28	3,12		
7	28	4,02		
8	28	3,05		

Os ensaios de módulo de deformação foram realizados aos 28 dias, os resultados para os três corpos-de-prova são apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Módulo de deformação secante para o concreto reciclado CR1

Nº Cp	f_{c28} (MPa)	E_{sec} (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
1	48,98	32,12	32,0	0,32
2	49,50	32,26		
3	46,20	31,65		

C – CONCRETO RECICLADO – CR7

C.1 – CONCRETO FRESCO

Na dosagem com o concreto reciclado CR7, devido à maior absorção do agregado reciclado em comparação ao agregado reciclado GR1 foi necessário aumentar a relação água/cimento para 0,48 visando obter o mesmo valor de abatimento do concreto de referência. Os ensaios realizados com o concreto no estado fresco forneceram os seguintes resultados, Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Resultados dos ensaios para o concreto reciclado CR7 no estado fresco

Propriedade	Resultado
Abatimento do tronco de cone	70 mm
Massa específica (γ_{cf})	2,37 kg/dm ³
Consumo real de cimento	449 kg/m ³

C.2 – CONCRETO ENDURECIDO

Para a caracterização do concreto no estado endurecido foram utilizados três corpos-de-prova (100x200). Na Tabela 5.22, encontra-se a média dos resultados para cada propriedade estudada.

Tabela 5.22 – Propriedades do concreto reciclado CR7 no estado endurecido

Propriedade	Resultado
Absorção de água por imersão	6,48 %
Índice de vazios	14,44 %
Massa específica amostra seca	2,226 kg/dm ³
Massa específica amostra saturada	2,371 kg/dm ³

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral são apresentados nas Tabelas 5.23 e 5.24.

Tabela 5.23 – Resistência à compressão – Concreto reciclado CR7

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	37,32	37,4	0,11
2	7	37,51		
3	7	37,32		
4	28	43,75	45,3	1,20
5	28	44,60		
6	28	45,58		
7	28	46,93		
8	28	45,61		

Tabela 5.24 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto reciclado CR7

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{tj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	1,83	2,0	0,28
2	7	1,80		
3	7	2,30		
4	28	3,04	3,2	0,17
5	28	3,30		
6	28	3,36		

Os ensaios de módulo de deformação foram realizados aos 28 dias, os resultados para os três corpos-de-prova são apresentados na Tabela 5.25.

Tabela 5.25 – Módulo de deformação secante para o concreto reciclado CR7

Nº Cp	f_{c28} (MPa)	E_{sec} (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
1	46,93	30,47	29,4	0,96
2	45,61	29,14		
3	41,08	28,61		

D – CONCRETO RECICLADO – CR28

D.1 – CONCRETO FRESCO

Na dosagem com o concreto reciclado CR28, devido à maior absorção do agregado reciclado foi necessário aumentar a relação água/cimento para 0,45 visando obter o mesmo valor de abatimento do concreto de referência. Os ensaios realizados com o concreto no estado fresco forneceram os seguintes resultados, Tabela 5.26.

Tabela 5.26 – Resultados dos ensaios para o concreto reciclado CR28 no estado fresco

Propriedade	Resultado
Abatimento do tronco de cone	50 mm
Massa específica (γ_{cf})	2,38 kg/dm ³
Consumo real de cimento	453 kg/m ³

D.2 – CONCRETO ENDURECIDO

Para a caracterização do concreto no estado endurecido foram utilizados três corpos-de-prova (100x200). Na Tabela 5.27, encontra-se a média dos resultados para cada propriedade estudada.

Tabela 5.27 – Propriedades do concreto reciclado CR28 no estado endurecido

Propriedade	Resultado
Absorção de água por imersão	6,50 %
Índice de vazios	14,56 %
Massa específica amostra seca	2,241 kg/dm ³
Massa específica amostra saturada	2,387 kg/dm ³

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral são apresentados nas Tabelas 5.28 e 5.29.

Tabela 5.28 – Resistência à compressão – Concreto reciclado CR28

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	39,26	37,9	1,21
2	7	36,98		
3	7	37,44		
4	28	50,65	49,2	1,79
5	28	46,98		
6	28	47,55		
7	28	51,70		
8	28	49,04		
9	28	49,40		

Tabela 5.29 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto reciclado CR28

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{tj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	3,11	2,5	0,59
2	7	2,30		
3	7	1,97		
4	28	3,23	3,3	0,41
5	28	3,42		
6	28	2,72		
7	28	3,23		
8	28	4,00		

Os ensaios de módulo de deformação foram realizados aos 28 dias, os resultados para os três corpos-de-prova são apresentados na Tabela 5.30.

Tabela 5.30 – Módulo de deformação secante para o concreto reciclado CR28

Nº Cp	f_{c28} (MPa)	E_{sec} (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
1	46,98	29,41	29,7	1,15
2	51,70	30,98		
3	49,40	28,74		

E – CONCRETO RECICLADO – CRNA28

E.1 – CONCRETO FRESCO

Na dosagem com o concreto reciclado CRNA28, devido à maior absorção do agregado reciclado e seu maior índice de vazios foi necessário aumentar a relação água/cimento para 0,48 visando obter o mesmo valor de abatimento do concreto de referência. Os ensaios realizados com o concreto no estado fresco forneceram os seguintes resultados, Tabela 5.31.

Tabela 5.31 – Resultados dos ensaios para o concreto reciclado CRNA28 no estado fresco

Propriedade	Resultado
Abatimento do tronco de cone	50 mm
Massa específica (γ_{cf})	2,36 kg/dm ³
Consumo real de cimento	447 kg/m ³

E.2 – CONCRETO ENDURECIDO

Para a caracterização do concreto no estado endurecido foram utilizados três corpos-de-prova (100x200). Na Tabela 5.32, encontra-se a média dos resultados para cada propriedade estudada.

Tabela 5.32 – Propriedades do concreto reciclado CRNA28 no estado endurecido

Propriedade	Resultado
Absorção de água por imersão	7,11 %
Índice de vazios	15,58 %
Massa específica amostra seca	2,190 kg/dm ³
Massa específica amostra saturada	2,346 kg/dm ³

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral são apresentados nas Tabelas 5.33 e 5.34.

Tabela 5.33 – Resistência à compressão – Concreto reciclado CRNA28

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{cj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	36,30	36,0	0,58
2	7	36,30		
3	7	35,30		
4	28	42,68	42,5	1,35
5	28	43,03		
6	28	42,88		
7	28	44,26		
8	28	41,61		
9	28	40,31		

Tabela 5.34 – Resistência à tração por compressão diametral – Concreto reciclado CRNA28

Nº Cp	Idade do ensaio	f_{tj} (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	7	1,80	2,3	0,47
2	7	2,70		
3	7	2,50		
4	28	2,83	3,1	0,19
5	28	3,12		
6	28	3,20		

Os ensaios de módulo de deformação foram realizados aos 28 dias, os resultados para os três corpos-de-prova são apresentados na Tabela 5.35.

Tabela 5.35 – Módulo de deformação secante para o concreto reciclado RNA28

Nº Cp	f_{c28} (MPa)	E_{sec} (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)
1	44,26	28,47	27,5	3,95
2	41,61	30,91		
3	40,31	23,18		

5.2.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE

Os resultados obtidos na primeira fase foram analisados comparativamente através de gráficos e tabelas que serão comentados no momento oportuno.

5.2.3.1. AGREGADOS

Os agregados reciclados apresentaram algumas diferenças com relação aos agregados naturais. Como visto na bibliografia e constatado na parte prática deste trabalho, os agregados reciclados são muito

influenciados pela camada de argamassa aderida à sua superfície. Devido a esta camada de argamassa aderida, os agregados reciclados apresentaram maior absorção e menor densidade quando comparados com os materiais naturais.

A – AGREGADOS MIÚDOS

Os agregados miúdos reciclados não foram utilizados nas dosagens desta pesquisa. HANSEN, 1985; VAN ACKER, 1996; DI NIRO et al. (1998); SAGOE-CRENSIL & BROWN (1998); PARK (1999) e WORKS BUREAU TECHNICAL CIRCULAR (2002) citam em suas pesquisas que o agregado miúdo reciclado não deva ser utilizado devido sua elevada absorção e grande variabilidade. A grande absorção desse agregado pode induzir a perda de trabalhabilidade da mistura e a uma excessiva retração do concreto podendo afetar a aderência do agregado graúdo uma vez que, a pasta de cimento que deveria estar aderida ao agregado graúdo pode estar aderida ao agregado miúdo reciclado.

A única propriedade física dos agregados miúdos reciclados analisada foi a granulometria. Nesta propriedade observou-se uma grande diferença entre o material natural e os reciclados. Para o material natural existe uma boa distribuição granulométrica e sua classificação foi areia média – zona 3, já para os agregados miúdos reciclados que foram classificados como areia grossa observou-se uma grande dispersão de partículas com grande porcentagem retida acumulada na peneira 2,4mm e pequena quantidade de finos passando na peneira 0,3mm. Este fato segundo RASHWAN & ABOURISK (1997) pode afetar a trabalhabilidade da mistura e algumas exigências da pasta. As curvas granulométricas são encontradas na Figura 5.6.

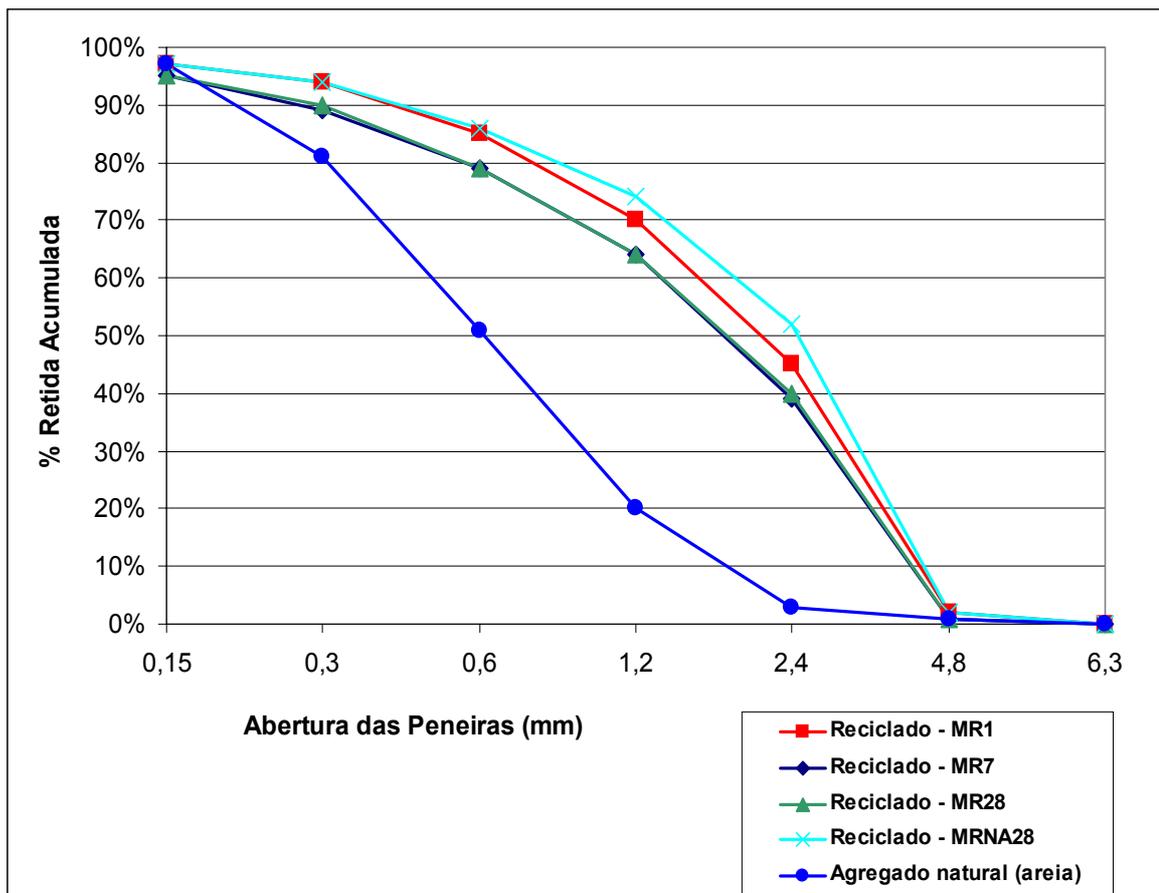


Figura 5.6 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos

Como observa-se na Figura 5.6, os agregados miúdos reciclados possuem uma dimensão de partículas maior do que o material natural. Esse fato deve-se as características do britador utilizado e da abertura da sua mandíbula que condicionam as características dos resíduos gerados. Nesta Figura 5.6, nota-se que para os diversos agregados miúdos reciclados analisados não foram notadas diferenças significativas com relação às suas granulometrias.

Nos estudos empreendidos por HANSEN (1985) e RASHWAN & ABOURISK (1997) foram encontrados resultados semelhantes aos apresentados por este trabalho. Os pesquisadores constataram que as partículas do agregado miúdo reciclado apresentam dimensões maiores quando comparadas com partículas de agregados naturais e, pequena quantidade de finos passando na peneira 0,3mm.

O procedimento japonês para uso de agregados reciclados e concretos reciclados citado por HANSEN (1985), recomenda que o tempo de armazenamento para os agregados miúdos reciclados seja pequeno, devido a existência de partículas não-hidratadas de cimento.

B – AGREGADOS GRAÚDOS

Antes da análise granulométrica, foi feita a separação dos agregados nas frações graúdas e miúdas. Na Tabela 5.36, encontram-se as porcentagens de agregados miúdos e graúdos para cada agregado reciclado.

Tabela 5.36 – Porcentagens de agregados graúdos e miúdos para cada agregado reciclado

Agregado Reciclado	% Agregados graúdos	% Agregados miúdos
R1	69,9% (GR1)	30,1% (MR1)
R7	74,8% (GR7)	25,2% (MR7)
R28	74,0% (GR28)	26,0% (MR28)
RNA28	73,6% (GRNA28)	26,4% (MRNA28)

Analisando a Tabela 5.36, pode-se concluir que a fração graúda torna-se mais representativa à medida que se aumenta o período de cura do resíduo de concreto antes da reciclagem. A maior quantidade de miúdos para o agregado reciclado R1 deve-se ao fato que durante o peneiramento ocorreu um maior desprendimento e quebra de partículas de argamassa que antes estavam aderidas ao agregado natural. A existência de grande quantidade de partículas de cimento não-hidratadas também é responsável pela elevada quantidade de miúdos, uma vez que estas não apresentavam ligação efetiva com a superfície do agregado.

A fração graúda ficou em torno de 70% a 75% do total; HANSEN (1985) e RAVINDRARAJAH et al. (1987) obtiveram resultados semelhantes para esta fração, com valores situados entre 70 e 75%.

B.1 – GRANULOMETRIA

Através da análise granulométrica, foi notada para os agregados graúdos reciclados, uma redução na dimensão máxima característica das partículas quando comparadas com o material natural. Novamente, a influência do britador e da abertura da sua mandíbula é que irá condicionar o tamanho das partículas. As curvas granulométricas dos agregados analisados encontram-se na Figura 5.7.

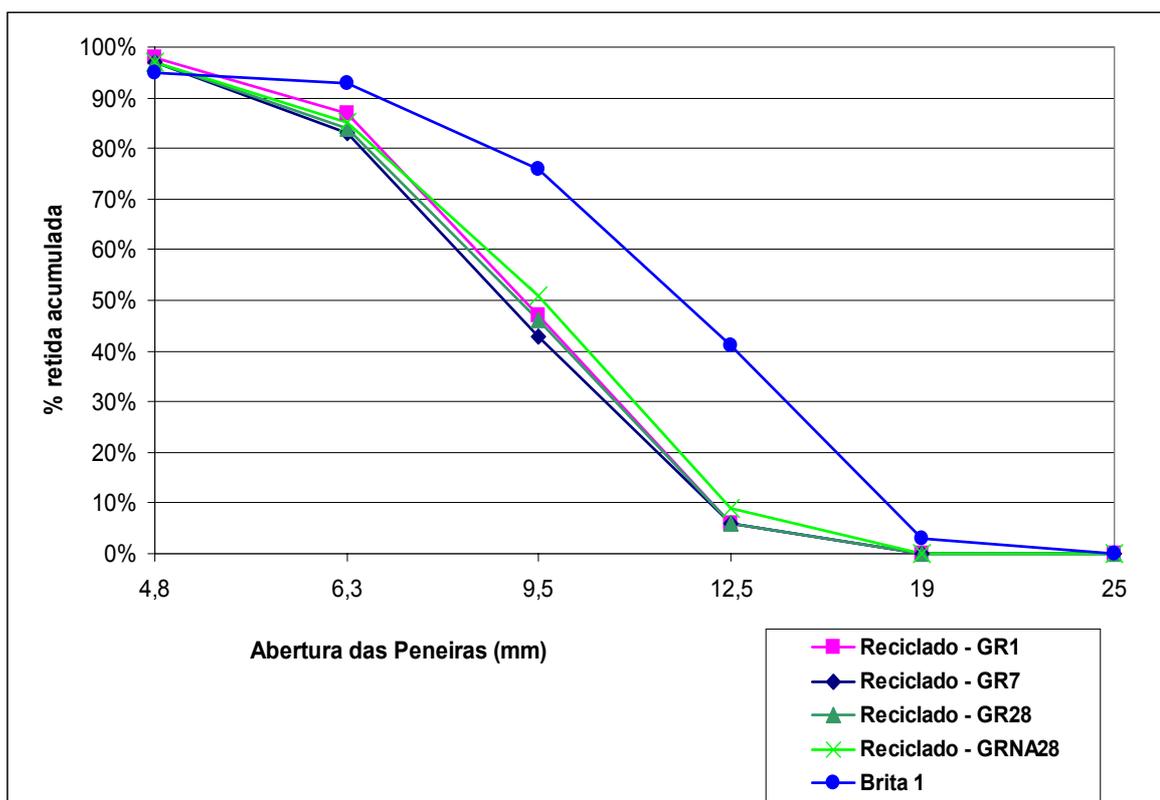


Figura 5.7 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos

Pelos resultados obtidos para os agregados reciclados, observa-se que a idade de reciclagem do concreto não influencia na granulometria do material. RASHWAN & ABOURISK (1997) citam que a idade de reciclagem dos agregados reciclados não influencia na granulometria.

VAN ACKER (1996) cita em seu trabalho que ambas as frações do material reciclado apresentaram uma grande dispersão de valores e possuíam uma grande quantidade de finos em comparação ao material

natural. De maneira geral, os resultados foram semelhantes aos obtidos por este trabalho.

Segundo SAGOE-CRENTSIL & BROWN (1998), a granulometria do agregado reciclado depende do processo de britagem utilizado.

B.2 - MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA

A quantidade de argamassa aderida aos agregados foi responsável pela redução da densidade do material reciclado quando comparado com o material natural. Os resultados são encontrados na Tabela 5.37.

Tabela 5.37 – Massa unitária e massa específica dos agregados graúdos (kg/dm^3)

Propriedade	Massa unitária Estado solto		Massa unitária compactada		Massa específica seca (γ_s)		Massa específica saturada (γ_{SSS})	
	Valor	Relação rec/nat	Valor	Relação rec/nat	Valor	Relação rec/nat	Valor	Relação rec/nat
Ag. Natural	1,505	1,00	1,666	1,00	2,816	1,00	2,872	1,00
Reciclado GR1	1,287	0,86	1,437	0,86	2,455	0,87	2,589	0,90
Reciclado GR7	1,287	0,86	1,426	0,86	2,398	0,85	2,552	0,89
Reciclado GR28	1,293	0,86	1,424	0,85	2,426	0,86	2,575	0,90
Reciclado GRNA28	1,258	0,83	1,411	0,85	2,393	0,85	2,542	0,88

Analisando a Tabela 5.37, observa-se que a relação entre as massas unitárias no estado solto para os agregados reciclados e para o material natural ficou com o valor médio de 0,85; para a massa unitária no estado compactado esta relação ficou com o valor médio de 0,86. De uma maneira geral, os resultados obtidos para as massas unitárias dos agregados reciclados foram similares, o agregado reciclado GR1 apresentou a maior massa unitária compactada ocasionada pelo seu maior teor de umidade quando comparado com os demais agregados. Para o agregado natural

foram obtidos os maiores valores para a massa unitária, devido ao seu menor índice de vazios.

A relação entre as massas específicas seca para os agregados reciclados e para o agregado natural ficou com o valor médio de 0,86; já para a massa específica saturada superfície seca esta relação ficou com o valor médio de 0,89. A densidade do agregado reciclado é cerca de 13% menor que a do material natural. Os agregados reciclados apresentaram resultados praticamente similares com relação a estas propriedades; o agregado reciclado GR1 apresentou o maior valor devido ao seu menor índice de vazios e o agregado reciclado GRNA28 que foi proveniente de um resíduo de concreto não-adensado apresentou o menor valor de massa específica devido ao seu maior índice de vazios. Para ilustrar o comportamento dos resultados obtidos nas propriedades de massa unitária e massa específica, confeccionou-se um gráfico relacionando os valores obtidos para os diferentes agregados estudados (Figura 5.8). No eixo das abcissas estão indicados os agregados, enquanto nas ordenadas procurou-se expressar cada valor obtido com relação ao agregado natural (brita 1).

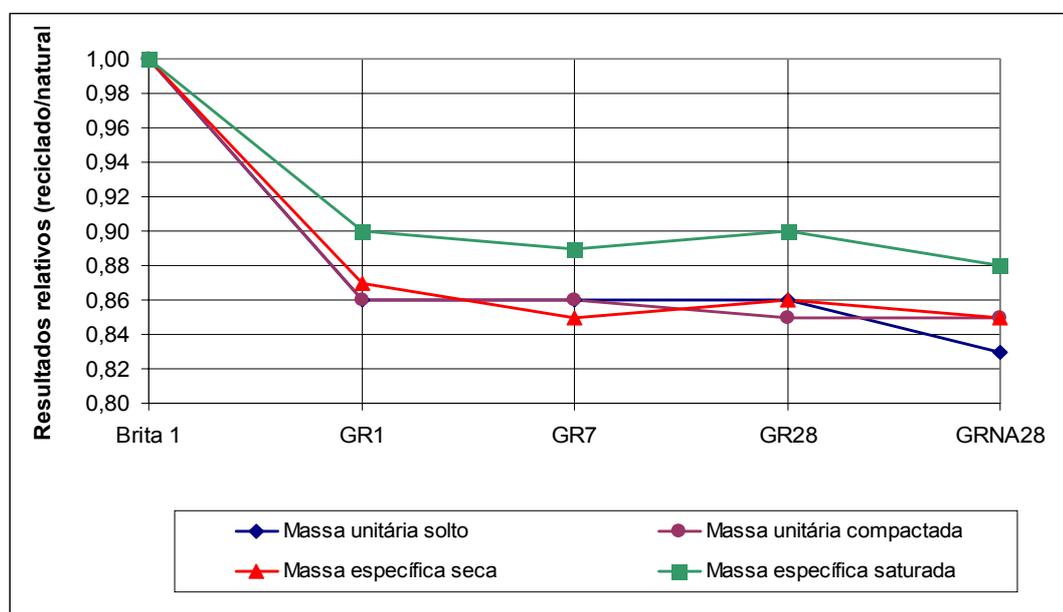


Figura 5.8 – Resultados relativos para as propriedades de massa unitária e específica

HANSEN & NARUD (1983) investigaram a influência da resistência do concreto original e do tamanho das partículas do agregado, na massa específica do agregado graúdo reciclado. Em suas análises, citam que o tamanho das partículas condiciona o valor da massa específica, mas por outro lado, não notaram nenhuma influência da resistência do concreto original nesta propriedade.

RASHWAN & ABOURISK (1997) citam que o valor da massa unitária é pouco influenciado pelo tempo de armazenamento. Com relação à idade de reciclagem dos resíduos de concreto, os maiores valores de massa unitária no estado compactado foram obtidos para o agregado reciclado R1 devido seu maior teor de umidade quando comparado com os demais agregados.

PARK (1999) analisou diferentes resíduos de concreto; os valores obtidos para a massa específica mostraram que a origem dos resíduos tem influencia sobre esta propriedade. Os agregados provenientes de resíduos de concreto moldados no laboratório apresentaram valores de massa específica situados entre 2,40 a 2,49kg/dm³ e, para agregados provenientes de resíduos de uma companhia de demolição, os valores variaram entre 2,45 a 2,57kg/dm³.

GONÇALVES (2000) obteve o resultado de 2,48kg/dm³ para o valor da massa específica seca do agregado reciclado e para a massa específica saturada superfície seca, o valor de 2,61kg/dm³. Em sua pesquisa, a massa específica do material reciclado ficou em cerca de dez por cento menor que a massa específica do material natural.

GÓMEZ-SOBERON (2002) cita que para agregados reciclados há um aumento da massa específica proporcional ao tamanho da partícula. Além disso, as diferenças entre as massas específicas seca e saturada superfície seca são maiores para os agregados reciclados quando comparadas com o agregado natural. Na sua pesquisa, obteve para a massa específica seca valores cerca de 14% menores e para a massa específica saturada

superfície seca valores em média nove por cento menores quando comparados com os valores obtidos para o agregado natural.

PADMINI et al. (2002) pesquisaram a influência da resistência do concreto original e do tamanho das partículas nas propriedades físicas dos agregados reciclados. Com relação ao tamanho das partículas, notou-se que há um pequeno aumento na massa específica (5%), à medida que se eleva o tamanho da partícula (10mm para 40mm); já para a resistência do concreto original, observou-se uma diminuição de cerca de três por cento na massa específica e um por cento na massa unitária no estado solto quando se eleva a resistência do concreto original de 35MPa para 56MPa. Estabelecendo uma análise comparativa com os resultados obtidos para o agregado natural, os pesquisadores encontraram uma redução média de cerca de 12% na massa específica do agregado reciclado, diminuição de cinco por cento na massa unitária no estado solto e cerca de sete por cento na massa unitária no estado compactado.

B.3 – ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

A absorção de água para os agregados graúdos reciclados é muito maior quando comparado com a absorção dos materiais naturais, isto se deve a elevada absorção da argamassa aderida às partículas de agregados. Os resultados obtidos são encontrados na Tabela 5.38 e Figura 5.9.

Tabela 5.38 – Absorção de água e índice de vazios

Propriedade	Índice de vazios (%)	Absorção de água (%)		
		10 minutos	30 minutos	24 horas
Agregado natural	5,52	1,24	1,37	1,96
Reciclado GR1	13,46	4,74	4,84	5,48
Reciclado GR7	15,38	5,67	5,81	6,41
Reciclado GR28	14,93	5,51	5,68	6,16
Reciclado GRNA28	14,94	5,59	5,66	6,25

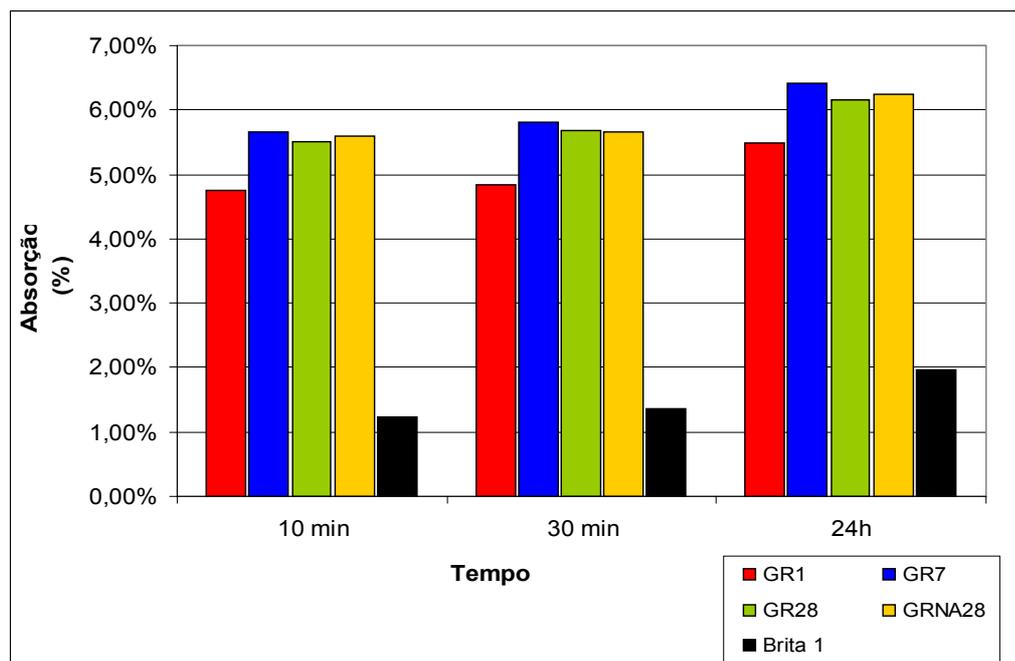


Figura 5.9 – Absorção dos agregados

Analisando-se os resultados observa-se que nos primeiros dez minutos, cerca de 88% da água total absorvida foi assimilada pelos agregados reciclados, este valor para o agregado natural foi de 63%. Esta grande absorção do agregado reciclado deve ser prevista, pois ela condiciona uma perda de trabalhabilidade considerável no concreto fresco. Segundo DE PAUW et al. (1998) os agregados reciclados absorverão parte da água da mistura, reduzindo a trabalhabilidade do concreto fresco, para minimizar este efeito, os autores recomendam a determinação dessa quantidade de água a ser absorvida através da realização de testes experimentais.

Os agregados reciclados GR7, GR28 e GRNA28 apresentaram resultados similares com relação à absorção de água e índice de vazios. O agregado reciclado GR1 obteve valores de absorção e índice de vazios inferiores aos registrados para os demais agregados; a absorção de água foi cerca de 15% menor e o índice de vazios cerca de 10% inferior; este fato pode ser explicado pela menor quantidade de argamassa aderida ao agregado reciclado GR1 que durante o processo de britagem e peneiramento acabaram se soltando devido à grande quantidade de

partículas não-hidratadas de cimento presentes na superfície do agregado. Pode-se concluir que quanto maior é o período de cura do resíduo de concreto, isto é, quanto maior for seu grau de hidratação, maior será o valor da sua absorção de água.

RASHWAN & ABOURISK (1997) encontraram resultados similares aos obtidos por este trabalho. Segundo os autores, os agregados com absorção de água elevada foram aqueles que apresentaram maiores graus de hidratação, sendo que esse fato pode ser atribuído a perda de umidade desses agregados para a hidratação do cimento e formação da pasta. O tempo de estocagem influenciou muito pouco nessa propriedade.

Algumas prescrições japonesas citadas por HANSEN (1985) não recomendam a utilização de agregados reciclados para produção de concretos, quando a absorção do agregado gráudo for superior a sete por cento e maior que 13% para os agregados miúdos reciclados.

GONÇALVES (2000) obteve resultados inferiores aos obtidos por esta pesquisa. Para o agregado gráudo reciclado, a absorção ficou em torno de 4,9% e o índice de vazios ficou em 12,3%.

PADMINI et al. (2002) notaram que para agregados reciclados originários de um concreto de determinada resistência, um aumento na dimensão máxima do agregado acarreta uma redução considerável na absorção de água; valores próximos a 50% quando se substituiu um agregado de dimensão máxima de 10mm por um agregado de 40mm. A resistência do concreto original tem pequena influência sobre a absorção de água dos reciclados, normalmente observa-se um ligeiro aumento da absorção quando se eleva a resistência do concreto original possivelmente devido a maior quantidade de argamassa aderida ao agregado.

WORKS BUREAU TECHNICAL CIRCULAR (2002) cita algumas recomendações para a produção de concreto pré-misturado com a utilização de 100% de agregados gráudos reciclados. Segundo essas recomendações,

o valor máximo aceitável para a absorção do agregado graúdo reciclado é de dez por cento.

B.4 – ABRASÃO LOS ANGELES

Os resultados obtidos no ensaio de abrasão Los Angeles encontram-se na Figura 5.10.

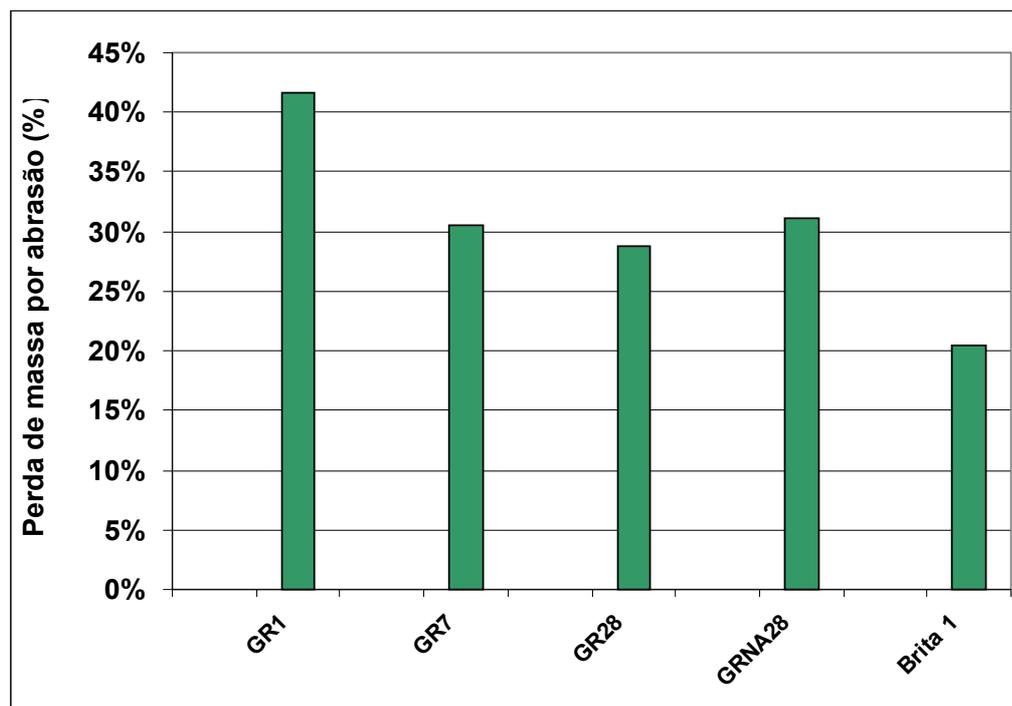


Figura 5.10 – Abrasão Los Angeles

Analisando-se a Figura 5.10, observa-se que o agregado graúdo natural teve a menor perda de massa por abrasão, cerca de 20,5%. Para o agregado reciclado GR1, foi obtida a maior perda de massa por abrasão, cerca de 41,7%; este fato pode ser atribuído à grande quantidade de partículas de cimento não-hidratadas aderidas à superfície do agregado e que no processo de abrasão e atrito acabam desprendendo-se do agregado gerando, como consequência, uma grande quantidade de finos. Os resultados para os demais agregados foram praticamente similares e foi observado que quanto maior o grau de hidratação do concreto menor será a perda de massa por abrasão.

HANSEN & NARUD (1983) obtiveram para agregados reciclados provenientes de resíduos de concreto de alta resistência valores de abrasão iguais a 22,4% e para agregados provenientes de resíduos de baixa resistência, o valor de perda de massa por abrasão ficou em torno de 41,4%. De acordo com a ASTM – C33 “Standard Specification for Concrete Aggregates”, os agregados podem ser utilizados na produção de concreto desde que, os valores de perda de massa por abrasão não ultrapassem 50%.

Para ilustrar o comportamento dos resultados obtidos para as propriedades de índice de vazios, absorção de água e abrasão Los Angeles, confeccionou-se um gráfico relacionando os valores obtidos para os diferentes agregados estudados (Figura 5.11). No eixo das abscissas estão indicados os agregados, enquanto nas ordenadas, procurou-se expressar cada valor obtido com relação aos resultados obtidos para o agregado natural (brita1).

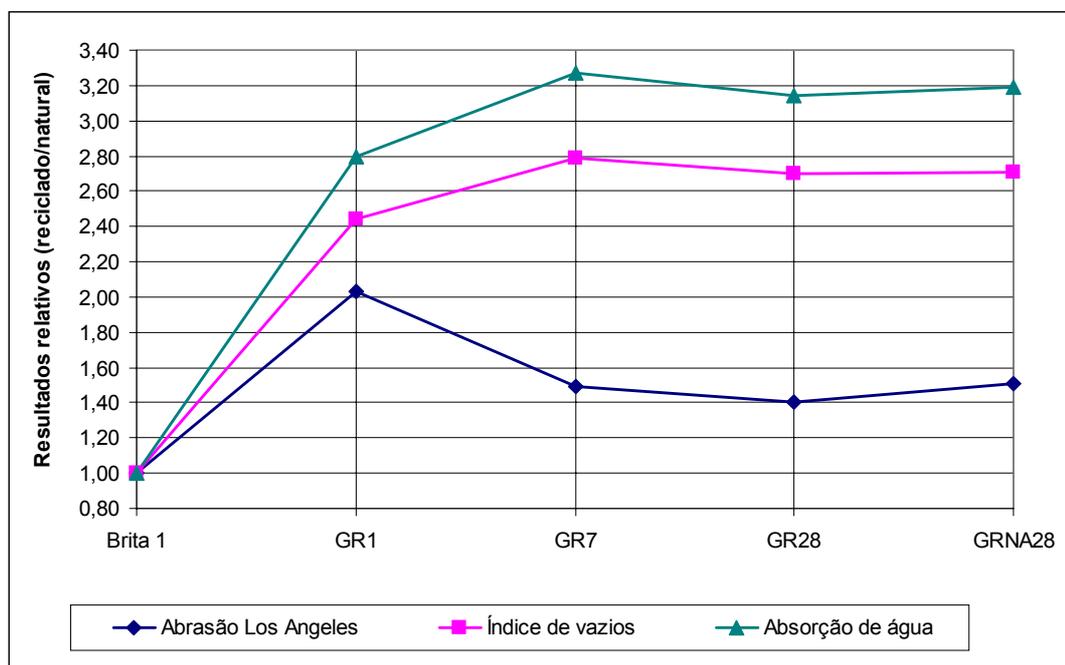


Figura 5.11 – Resultados relativos para as propriedades de absorção de água, índice de vazios e abrasão Los Angeles

5.2.3.2 – CONCRETO

As dosagens com agregados reciclados tiveram uma perda de trabalhabilidade considerável devido à elevada absorção dos agregados. A grande quantidade de argamassa aderida ao agregado reciclado influenciou as propriedades de massa específica e o módulo de deformação. Já para os resultados de resistência à compressão e tração não foi observada uma grande influência dos reciclados.

Para o concreto reciclado CR1 foram obtidos os resultados mais satisfatórios quando comparados com os demais concretos. A existência de grande quantidade de partículas não-hidratadas de cimento aderidas à superfície do agregado e a excelente aderência entre agregado e pasta podem ser apontados como os responsáveis por estes resultados.

Como já citado anteriormente, esta pesquisa teve cinco dosagens com as seguintes características, Tabela 5.39.

Tabela 5.39 – Principais características das dosagens da pesquisa

Dosagem	Composição
1 - Concreto natural – referência	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – brita 1
2 - Concreto reciclado (CR1)	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado (GR1)
3 - Concreto reciclado (CR7)	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado (GR7)
4 - Concreto reciclado (CR28)	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado (GR28)
5 - Concreto reciclado (CRNA28)	Agregado miúdo – areia natural Agregado graúdo – agregado reciclado (GRNA28)

A – CONCRETO FRESCO

A.1 – CONSISTÊNCIA

Um dos parâmetros considerados para a comparação das dosagens foi a trabalhabilidade. Para todas as dosagens, a trabalhabilidade medida através do ensaio de abatimento de tronco de cone deveria ser igual ao resultado obtido para o concreto de referência, (60 ± 10) mm.

Inicialmente, foi realizado um ensaio piloto visando determinar a relação água/cimento para todas as dosagens visando obter resultados similares com relação à trabalhabilidade. As relações água/cimento e os resultados do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone, são apresentados na Tabela 5.40.

Tabela 5.40 – Relações água/cimento e valores de consistência pelo abatimento de tronco de cone para cada uma das dosagens

Dosagem	Relação água/cimento	Abatimento do tronco de cone (mm)
Referência	0,41	60
CR1	0,45	50
CR7	0,48	70
CR28	0,45	50
CRNA28	0,48	50

Como se observa na Tabela 5.40, caso não houvesse a correção da relação água/cimento para as dosagens com agregados reciclados, ocorreria uma grande perda de consistência. Para as dosagens que empregaram o concreto reciclado CR1 e CR28, foram obtidos os menores valores para a relação água/cimento devido à menor absorção dos agregados reciclados GR1 e GR28 quando comparados com os agregados reciclados GR7 e GRNA28. Estes resultados ratificam os valores obtidos para a absorção dos agregados reciclados encontrados na Tabela 5.38.

O aumento da relação água/cimento para os concretos com agregados reciclados deve-se à sua grande absorção, cerca de três vezes

maior nos dez primeiros minutos quando comparada com o agregado natural. A grande absorção do agregado reciclado tira uma considerável quantidade de água que antes seria utilizada para dar trabalhabilidade à mistura. Portanto deve-se adicionar mais água para evitar que ela fique mais seca e menos trabalhável em relação à mistura com agregados naturais.

HANSEN & NARUD (1983) e HANSEN (1985) citam que para se manter as mesmas características de consistência do concreto natural, se deve adicionar mais cinco por cento de água na mistura quando utilizamos a fração graúda reciclada. Além disso, a perda de trabalhabilidade do concreto reciclado é maior devido o agregado continuar absorvendo água da mistura.

Para misturas com agregados miúdos e graúdos reciclados, deve-se adicionar cerca de 15% a mais de água para se manter as mesmas características de consistência do concreto natural (TOPÇU, 1997).

ABOURISK & RASHWAN (1997) constataram a grande perda de trabalhabilidade do concreto com agregados reciclados. Segundo os autores, os principais fatores que afetam a trabalhabilidade referem-se à falta de materiais finos, a alta absorção do agregado reciclado, a superfície áspera e as formas lamelares do agregado.

GONÇALVES (2000) utilizou a relação água/cimento como parâmetro para todas as dosagens. Com o emprego da fração graúda reciclada ocorreu uma grande perda de consistência com abatimento quase nulo, para as demais dosagens com agregados miúdos reciclados foi necessária a adição de um superplastificante.

A.2 – MASSA ESPECÍFICA

A massa específica do concreto fresco é muito influenciada pelas características do agregado graúdo. Os agregados reciclados possuem uma menor densidade quando comparado com os materiais naturais devido a grande quantidade de partículas de argamassa aderidas à sua superfície e, este fato acaba ocasionando uma redução da massa específica do concreto fresco, Tabela 5.41.

Tabela 5.41 – Massa específica do concreto no estado fresco

Dosagem	Massa específica (kg/dm³)	Relação reciclado/natural
Referência	2,49	1,00
CR1	2,39	0,96
CR7	2,37	0,95
CR28	2,38	0,96
CRNA28	2,36	0,95

Analisando-se a Tabela 5.41, observa-se que os concretos reciclados apresentaram resultados praticamente similares com relação à massa específica no estado fresco. De maneira geral, a massa específica do concreto fresco reciclado ficou em média cinco por cento menor que a massa específica do concreto natural, aproximadamente 0,115kg/dm³.

HANSEN (1985) cita os resultados de algumas pesquisas, em relação à massa específica no estado fresco. A redução no valor da massa específica situa-se entre cinco a quinze por cento em relação ao concreto natural dependendo dos procedimentos adotados na mistura e a eficiência do adensamento.

GONÇALVES (2000) utilizando a fração graúda reciclada e miúda natural, encontrou uma redução média de cerca de quatro por cento na massa específica do concreto reciclado, ou seja, 0,080kg/dm³ menor quando comparado com o concreto natural.

B – CONCRETO ENDURECIDO

As maiores diferenças entre os concretos naturais e os reciclados são encontradas nas propriedades relacionadas ao módulo de deformação, densidade e absorção de água. Para as demais propriedades, resistência à compressão e tração, não foi observada nenhuma influência da fração graúda reciclada; os resultados para estas propriedades foram até maiores quando comparadas com os concretos naturais de características similares.

B.1 – MASSA ESPECÍFICA

A massa específica do concreto endurecido é influenciada principalmente pela massa específica do agregado graúdo. Na parte experimental deste trabalho notou-se uma diminuição da massa específica do agregado reciclado em cerca de 13% quando comparada com os valores obtidos para o agregado natural. Os resultados da massa específica para o concreto no estado endurecido encontram-se na Tabela 5.42

Tabela 5.42 – Massa específica do concreto no estado endurecido

Dosagem	Massa específica seca (kg/dm ³)	Relação reciclado/natural	Massa específica saturada (kg/dm ³)	Relação reciclado/natural
Referência	2,406	1,00	2,517	1,00
CR1	2,262	0,94	2,398	0,95
CR7	2,226	0,92	2,371	0,94
CR28	2,241	0,93	2,387	0,95
CRNA28	2,190	0,91	2,346	0,93

Analisando-se os resultados, observa-se que a dosagem de referência apresentou os maiores valores de massa específica seca e saturada devido a maior massa específica do agregado graúdo quando comparado com o agregado reciclado. O concreto reciclado CRNA28 apresentou os menores valores de massa específica devido à menor massa

específica do agregado reciclado e seu maior índice de vazios. Para a massa específica seca, nota-se uma redução média de cerca de sete por cento para os concretos reciclados em relação ao concreto natural e para a massa específica saturada esta redução é de cerca de seis por cento.

BARRA & VÁSQUEZ (1998) encontraram o valor médio de seis por cento para a diminuição do valor da massa específica do concreto reciclado em relação ao concreto natural.

Para a substituição de 60% dos agregados graúdos naturais por reciclados, KNIGHTS (1998) encontrou o valor médio de quatro por cento para a redução do valor da massa específica do concreto reciclado quando comparado ao natural.

GONÇALVES (2000) utilizando a fração graúda reciclada obteve valores cerca de cinco por cento menores para a massa específica do concreto reciclado em relação ao concreto natural.

POON et al. (2002) confeccionou blocos de concreto e pavimentação com a utilização de agregados reciclados. Os pesquisadores encontraram uma redução média de cerca de 5% na massa específica do concreto reciclado em relação ao natural.

B.2 – ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Com o emprego do material reciclado é notado um aumento do valor da absorção de água e índice de vazios. Os valores encontrados para a absorção de água e índice de vazios encontram-se na Tabela 5.43.

Tabela 5.43 – Absorção de água e índice de vazios

Dosagem	Absorção de água (%)	Relação reciclado/natural	Índice de vazios (%)	Relação reciclado/natural
Referência	4,65	1,00	11,17	1,00
CR1	6,01	1,29	13,60	1,22
CR7	6,48	1,39	14,44	1,29
CR28	6,50	1,41	14,56	1,30
CRNA28	7,11	1,53	15,58	1,39

Analisando-se os resultados, observa-se que o concreto reciclado CR1 apresentou os menores valores de absorção de água e índice de vazios quando comparado com os demais concretos reciclados, este fato pode ser atribuído a menor quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado reciclado GR1 e a sua menor absorção. Para o concreto reciclado CRNA28, foram obtidos os maiores valores para estas propriedades devido à maior quantidade de argamassa aderida ao agregado e seu maior índice de vazios.

Os concretos com agregados reciclados apresentaram uma absorção média cerca de 40% superior à do concreto natural e índice de vazios cerca de 30% maior. Na Figura 5.12, pode ser observada a íntima relação entre as propriedades de massa específica e absorção de água, sendo que as hipóteses levantadas para explicação dos resultados de massa específica são corroboradas pelos resultados de absorção.

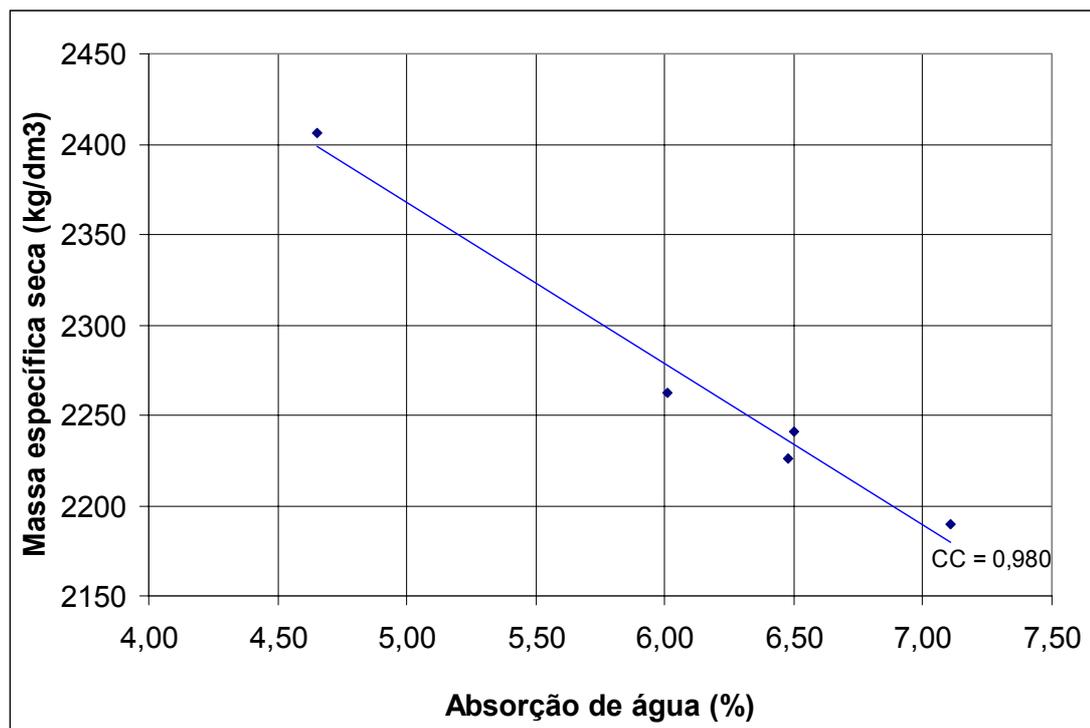


Figura 5.12 – Comportamento da massa específica em função da absorção de água

HANSEN (1985) recomenda uma redução na relação água/cimento de 0,05 a 0,10 para que o concreto reciclado tenha uma absorção comparável ao concreto natural. Segundo o autor, para concretos reciclados com resistência elevada e que apresentem baixa relação água/cimento, a absorção de água é muito maior que o valor do correspondente concreto de referência. A explicação para este fato é que para tais concretos, a influência do agregado graúdo é mais pronunciada, pois ele possui uma porosidade muito maior que do material natural e, como fica distribuído em uma matriz de argamassa mais densa que de concretos de resistência mais baixa, sua influência torna-se mais evidente.

Para concretos com agregados graúdos reciclados, GONÇALVES (2000) obteve valores 20% superiores para a absorção e 15% maiores para o índice de vazios em relação aos obtidos para o concreto natural.

B.3 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Através da pesquisa bibliográfica, constatou-se que a influência do agregado graúdo na resistência do concreto geralmente não é levada em consideração. A porosidade da matriz, bem como a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo é que normalmente determinam a característica de resistência dos concretos usuais.

Pela análise de inúmeros artigos, HANSEN (1985) cita que a resistência à compressão dos concretos com agregados graúdos reciclados sofre uma pequena redução em relação a resistência à compressão do concreto com agregados naturais de mesmas características, esta redução situa-se em cerca de cinco por cento.

A influência das características dos resíduos de concreto para a resistência à compressão do concreto com agregados reciclados são citadas por inúmeras pesquisas. Segundo HANSEN (1985), KIKUCHI et al. (1998) e AJDUKIEWICZ & KLISZCZEWICZ (2002), a resistência do concreto reciclado depende fundamentalmente da relação água/cimento adotada e da resistência do concreto original.

RYU (2002) avaliou a influência do agregado reciclado sobre as propriedades da zona de transição e as características de resistência do concreto. Segundo o autor, quando se emprega uma relação água/cimento elevada ($>0,55$), a resistência não é afetada pelas características do agregado reciclado; por outro lado, quando se utiliza uma relação água/cimento baixa ($<0,40$), as características do agregado reciclado influenciam significativamente a resistência à compressão e tração. Através do ensaio “Vickers Hardness” que avaliou as características da zona de interface, os pesquisadores encontraram resultados similares entre a resistência da zona de transição dos concretos reciclados em relação à resistência apresentada pelo concreto com agregados naturais.

Os resultados obtidos para as dosagens da presente pesquisa encontram-se na Tabela 5.44 e Figura 5.13.

Tabela 5.44 – Valores de resistência à compressão aos 7 e 28 dias para as dosagens

Dosagem	Idade (dias)	Resistência à compressão média (MPa)	Relação reciclado/natural
Referência	7	36,36	1,00
CR1	7	39,31	1,08
CR7	7	37,38	1,03
CR28	7	37,89	1,04
CRNA28	7	35,97	0,99
Referência	28	44,48	1,00
CR1	28	47,74	1,07
CR7	28	45,29	1,02
CR28	28	49,22	1,11
CRNA28	28	42,46	0,95

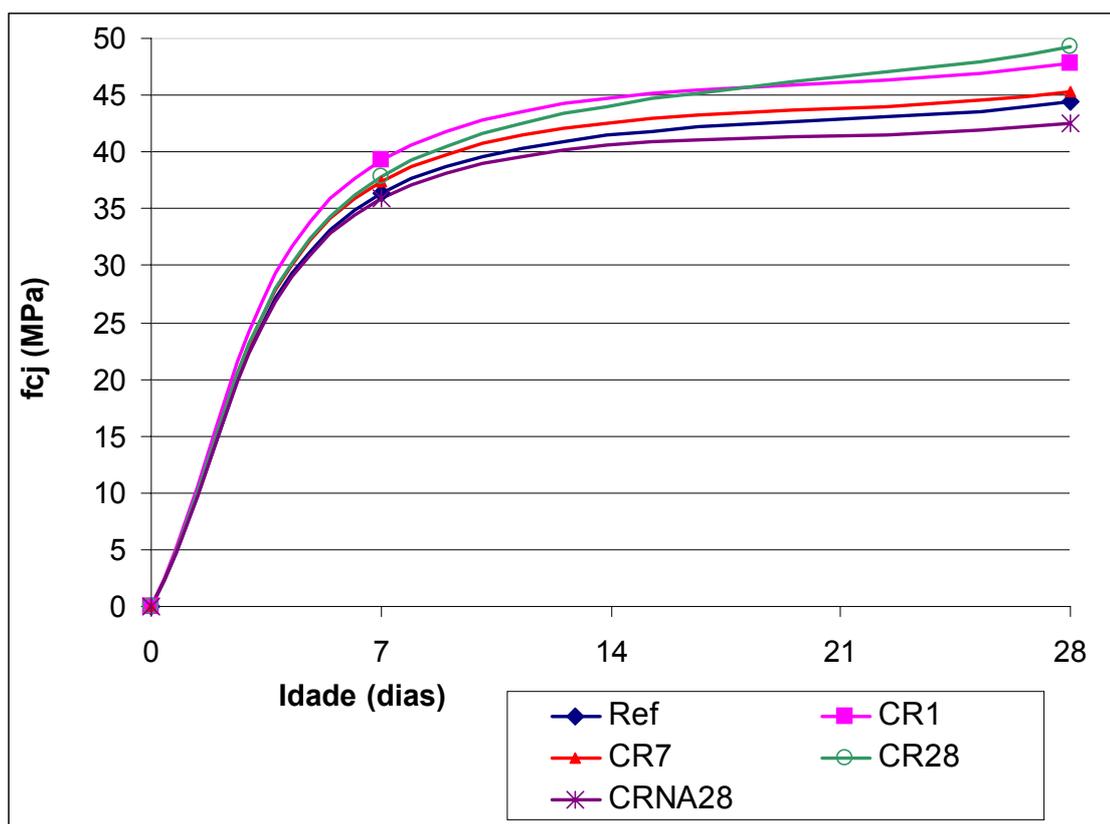


Figura 5.13 – Gráfico de resistência à compressão para as dosagens

Analisando-se os resultados, observa-se que apenas o concreto reciclado CRNA28 apresentou resistência à compressão inferior à obtida para o concreto de referência. O agregado reciclado GRNA28, que foi

originário de um concreto não-adensado e que possuía alto índice de vazios, ocasionou uma redução na resistência do concreto CRNA28 através do aumento na porosidade da zona de transição provocado pelo seu alto índice de vazios. Outro fator que pode ter provocado a diminuição da resistência se refere à mobilização de água do agregado reciclado para a pasta devido a maior relação água/cimento utilizada nesta dosagem (CRNA28). Segundo BARRA & VÁZQUEZ (1998) essa mobilização da água do agregado para a pasta pode acontecer no estado fresco; nessas condições, a saída de água do agregado representará um aumento na relação água/cimento e na porosidade da zona de transição.

Para as demais dosagens, foram obtidos resultados de resistência à compressão superiores aos obtidos pelo concreto de referência. Podem ser enumeradas duas justificativas para este fato: a) a existência de grande quantidade de partículas de cimento não-hidratadas aderidas à superfície do agregado que se hidratam na nova mistura com agregados reciclados; b) apesar das maiores relações água/cimento para os concretos reciclados, pode ocorrer a migração da água do agregado para a pasta logo após seu endurecimento; nestas condições, a água presente no interior do agregado promoverá uma “cura interna” na zona de transição melhorando suas propriedades.

Na tabela 5.45, encontra-se uma comparação entre os resultados de resistência à compressão obtidos para os concretos reciclados CR1 e CR28.

Tabela 5.45 – Comparação entre os resultados de resistência à compressão para os concretos CR1 e CR28

Dosagem	Idade (dias)	Resistência à compressão média (MPa)	Relação CR28/CR1
CR1	7	39,3	1,00
CR28	7	37,9	0,96
CR1	28	47,7	1,00
CR28	28	49,2	1,03

Com relação à resistência à compressão aos 7 dias, observa-se que o concreto CR1 obteve valores de resistência cerca de 4% superiores quando comparado com o concreto reciclado CR28. Esta tendência modifica-se aos 28 dias, quando o concreto CR28 apresenta uma resistência cerca de 3% maior em comparação com o concreto CR1. Para explicar estes resultados, é necessário conhecer duas características fundamentais que determinam as propriedades do concreto reciclado, Figura 5.14.



- Propriedades da nova matriz de cimento (D)
- Características da argamassa aderida ao agregado reciclado (B)

Figura 5.14 – Microestrutura do concreto reciclado

Na verdade, quando se analisam reciclados provenientes de diferentes idades de reciclagem, isto é, que apresentam distintos graus de hidratação deve-se considerar a existência de dois mecanismos opostos que controlam as propriedades desses agregados: a) propriedades mecânicas dos agregados reciclados que se diferenciam entre si, em virtude das

diferentes idades de reciclagem; b) capacidade aglomerante das partículas de cimento não-hidratado que restam nos agregados reciclados e, que novamente são dependentes das diferentes idades de reciclagem.

A partir do exposto acima, pode-se chegar às seguintes justificativas com relação aos resultados obtidos para a resistência à compressão aos 7 dias:

- A nova matriz de cimento apresenta cerca de 80% da resistência que apresentará aos 28 dias.
- A grande quantidade de partículas não-hidratadas de cimento presentes na argamassa aderida ao agregado reciclado GR1. Essas partículas hidratam-se na nova mistura e acabam contribuindo positivamente para as propriedades mecânicas do concreto; já para o agregado GR28, a quantidade de partículas não-hidratadas de cimento é muito pequena.
- Apesar da menor resistência do agregado reciclado GR1, ocorre um rápido ganho de resistência com a hidratação das partículas de cimento presentes na argamassa aderida ao agregado. A hidratação dessas partículas acaba sendo fundamental para a maior resistência à compressão do concreto reciclado CR1 quando comparado com o concreto CR28.

Com relação aos resultados de resistência à compressão aos 28 dias, as seguintes justificativas podem ser enumeradas:

- Aumento da resistência da nova matriz de cimento.
- O efeito provocado pela hidratação de partículas de cimento presentes no agregado reciclado GR1 tem pequeno efeito e contribuição na resistência aos 28 dias, uma vez que grande parte dessas partículas já haviam se hidratado nos primeiros sete dias.

- A resistência limite do conjunto é dada pela resistência do agregado reciclado (agregado + argamassa aderida). Dessa forma, os menores valores encontrados para a resistência à compressão do concreto CR1 deve-se à menor resistência do agregado GR1 quando comparado com o agregado GR28.

Os resultados de resistência à compressão para diversos pesquisadores encontram-se resumidos na Tabela 5.46.

Tabela 5.46 – Relação entre a resistência à compressão dos concretos com agregados graúdos reciclados pelos naturais

Pesquisa	Relação reciclado/natural
Pesquisa atual	1,08
FRONDISTOU-YANNAS (1977)	0,86
HANSEN (1985)	0,95
RAVINDRARAJAH et al. (1987)	0,87
GUNÇAN & TOPÇU (1995)	0,90
SOROUSHAN & TAVAKOLI (1996)	1,00
RASHWAN & ABOURISK (1997)	1,25
BARRA & VÁZQUEZ (1998)	0,89
TERANISHI et al. (1998)	0,92
PARK (1999)	0,91
GONÇALVES (2000)	1,02
AJDUKIEWICZ & KLISZCZEWICZ (2002)	1,04

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.46, pode-se concluir:

- A utilização da fração graúda praticamente não condiciona a uma perda de resistência. Nesta propriedade, a qualidade do resíduo acaba sendo decisiva.
- Os resultados obtidos na análise experimental foram ligeiramente superiores aos obtidos pelos demais pesquisadores. Este fato pode ser explicado pela importância do grau de hidratação do resíduo de

concreto sobre as propriedades mecânicas do concreto reciclado que foi avaliada somente por esta pesquisa e por RASHWAN & ABOURISK (1997).

B.4 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A resistência à tração do concreto é influenciada basicamente pelas características da matriz e da zona de transição. As características do agregado reciclado, como sua superfície áspera e irregular e partículas angulares favorecem a resistência à tração do concreto, pois provocam a retenção de grande quantidade de partículas de cimento na sua superfície resultando numa excelente aderência entre agregado e pasta.

Os resultados obtidos para esta propriedade encontram-se na Tabela 5.47.

Tabela 5.47 – Valores de resistência à tração aos 7 dias e 28 dias para as dosagens

Dosagem	Idade (dias)	Resistência à tração média (MPa)	Relação reciclado/natural
Referência	7	2,68	1,00
CR1	7	2,92	1,09
CR7	7	1,97	0,74
CR28	7	2,46	0,92
CRNA28	7	2,33	0,87
Referência	28	3,33	1,00
CR1	28	3,44	1,04
CR7	28	3,24	0,97
CR28	28	3,32	0,99
CRNA28	28	3,05	0,92

Pela Tabela 5.47, observa-se uma redução média na resistência à tração para os concretos com agregados reciclados de cerca de 16% aos 7 dias e cerca de quatro por cento aos 28 dias em relação ao concreto natural, exceto para o concreto reciclado CR1. A maior resistência à tração para a

dosagem que empregou o reciclado GR1, pode ser explicada pelos seguintes fatores:

- A existência de partículas não-hidratadas de cimento no agregado; estas partículas hidratam-se na nova mistura melhorando a aderência entre pasta e agregado. Sendo a resistência à tração intimamente ligada às características da matriz e da zona de transição, uma melhoria nestas regiões ocasionará um aumento na resistência à tração.
- O processo de cura interna que ajuda na melhoria da aderência entre pasta e agregado através da movimentação da água presente no agregado para a pasta após o seu endurecimento.

Na tabela 5.48, encontra-se uma comparação entre os resultados de resistência à tração obtidos para os concretos reciclados CR1 e CR28.

Tabela 5.48 – Comparação entre os resultados de resistência à tração para os concretos CR1 e CR28

Dosagem	Idade (dias)	Resistência à tração média (MPa)	Relação R28/R1
CR1	7	2,92	1,00
CR28	7	2,46	0,84
CR1	28	3,44	1,00
CR28	28	3,32	0,97

Com relação à resistência à tração aos 7 dias, observa-se que o concreto CR1 obteve valores de resistência cerca de 16% superiores quando comparado com o concreto reciclado CR28. Esta tendência mantém-se aos 28 dias; entretanto, o ganho de resistência para o concreto CR1 é de apenas 18%, enquanto isso, para o concreto CR28 esse ganho é substancialmente maior e representa cerca de 35%. Analisando os resultados aos 28 dias, a diferença na resistência à tração entre o concreto CR1 e o concreto CR28 situa-se em cerca de três por cento.

A explicação para este fato recai sobre algumas das considerações feitas anteriormente para a resistência à compressão. Com relação aos resultados de resistência à tração aos 7 dias, as seguintes justificativas podem ser enumeradas :

- A nova matriz de cimento apresenta cerca de 80% da resistência que apresentará aos 28 dias.
- A grande quantidade de partículas não-hidratadas de cimento presentes na argamassa aderida ao agregado reciclado GR1. Essas partículas hidratam-se na nova mistura e acabam contribuindo positivamente para as propriedades mecânicas do concreto; para o agregado GR28, a quantidade de partículas não-hidratadas de cimento é muito pequena.
- Apesar da menor resistência do agregado reciclado GR1, ocorre um rápido ganho de resistência com a hidratação das partículas de cimento presentes na argamassa aderida ao agregado. A hidratação dessas partículas acaba sendo fundamental para a maior resistência à tração do concreto reciclado CR1 quando comparado com o concreto CR28.

Com relação aos resultados de resistência à tração aos 28 dias, as seguintes justificativas podem ser enumeradas:

- Aumento da resistência da nova matriz de cimento.
- O efeito provocado pela hidratação de partículas de cimento presentes no agregado reciclado GR1 tem pequeno efeito e contribuição na resistência aos 28 dias, uma vez que grande parte dessas partículas já haviam se hidratado nos primeiros sete dias. Devido à pequena contribuição das partículas não-hidratadas na resistência final, os valores encontrados para a resistência a tração dos concretos CR1 e CR28 são praticamente similares.

HANSEN (1985) cita inúmeras pesquisas que avaliaram a resistência à tração de concretos com agregados graúdos reciclados. Os resultados mostram que não há diferença significativa entre a resistência à tração para concretos reciclados e concretos naturais.

RAVINDRARAJAH et al. (1987) encontraram uma diminuição de cerca de dez por cento na resistência à tração para concretos com agregados graúdos reciclados quando comparado com os concretos naturais.

B.5 – MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

O módulo de deformação do concreto é influenciado significativamente pelas características do agregado graúdo, sendo a porosidade uma das mais importantes. A porosidade do agregado determina sua rigidez, que por sua vez controla a capacidade do agregado em restringir deformações da matriz.

Os agregados reciclados que possuem uma maior porosidade quando comparados com os materiais naturais apresentarão menor módulo de deformação, devido à sua menor capacidade em restringir deformações da matriz.

Os resultados do módulo de deformação aos 28 dias para as dosagens utilizadas encontram-se na Tabela 5.49.

Tabela 5.49 – Valores do módulo de deformação para as dosagens utilizadas

Dosagem	Módulo de deformação (GPa)	Relação reciclado/natural
Referência	35,45	1,00
CR1	32,01	0,90
CR7	29,41	0,83
CR28	29,71	0,84
CRNA28	27,52	0,78

Analisando os resultados, observa-se uma redução média de 16% no módulo de deformação do concreto reciclado em relação ao natural. A resistência à compressão da dosagem com o agregado GR1 foi cerca de dez por cento maior quando comparada com a dosagem de referência, apesar da maior resistência que conduziria a um maior módulo de deformação ocorreu uma redução em cerca de dez por cento no valor do módulo devido à maior porosidade do agregado reciclado quando comparado com o agregado natural.

O maior valor para as dosagens com reciclados foi obtida pela dosagem com o agregado GR1, devido à menor porosidade do agregado reciclado em comparação aos demais agregados reciclados. Já para a dosagem com o agregado reciclado GRNA28 foram obtidos os menores valores de módulo de deformação, uma redução de cerca de 22% em relação ao natural.

As recomendações da RILEM (1994) fornecem um coeficiente de correção para o módulo de deformação do concreto reciclado, que deverá ser multiplicado pelo valor encontrado para o valor do módulo de deformação do concreto natural de mesmas características. Esse coeficiente a ser empregado é igual a 0,80 e aproxima-se muito do valor encontrado por este trabalho que é igual a 0,84.

FRONDISTOU-YANNNAS (1977) encontrou uma redução média de cerca de 40% no módulo de deformação do concreto reciclado quando comparado com o concreto natural.

A utilização do concreto com agregado graúdo reciclado ocasionou uma redução de 15 a 30% no módulo de deformação quando comparado com o concreto natural (HANSEN & BOEGH, 1985).

PARK (1999) obteve uma redução de cerca de 24 a 30% no módulo de deformação do concreto reciclado em relação ao natural.

GONÇALVES (2000) empregando a fração graúda reciclada encontrou uma redução de cerca de 11% no módulo de deformação em relação ao módulo do concreto com agregados naturais.

Para ilustrar o comportamento dos resultados obtidos para as propriedades do concreto no estado endurecido, confeccionou-se um gráfico relacionando os valores obtidos para os diferentes concretos estudados (Figura 5.15). No eixo das abscissas estão indicados os concretos, enquanto nas ordenadas, procurou-se expressar cada valor obtido com relação ao concreto de referência.

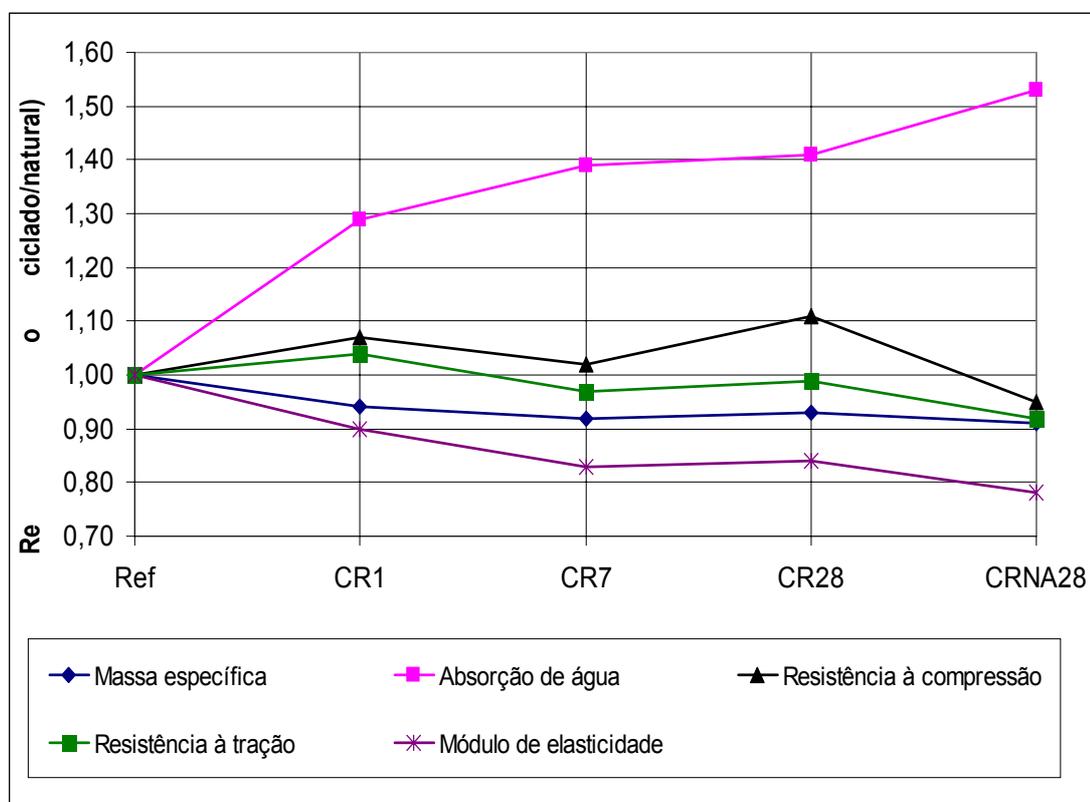


Figura 5.15 – Resultados relativos para as propriedades do concreto no estado endurecido

5.3. SEGUNDA FASE DA PESQUISA

Na segunda fase desta pesquisa foi estudada a retração por secagem utilizando os mesmos traços definidos na primeira fase. O estudo foi comparativo entre todos os concretos reciclados, tendo como parâmetro os resultados de retração para os concretos com agregados naturais.

Como já esperado, os concretos reciclados apresentaram valores de retração por secagem superiores aos obtidos para os concretos naturais. Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a retração é influenciada significativamente pelo módulo de deformação do agregado e pela relação água/cimento; neste contexto, os agregados reciclados apresentando menores módulos de deformação e dosagens com relações água/cimento maiores quando comparados com os concretos naturais terão evidentemente valores superiores para a retração por secagem.

O procedimento experimental para avaliação do desenvolvimento da retração por secagem foi realizado segundo as recomendações da ASTM C157/93, utilizando corpos-de-prova prismáticos $(75 \times 75 \times 285) \text{mm}^3$ – três exemplares para cada condição de ensaio, totalizando 15 corpos-de-prova. Antes de proceder ao ensaio, foram moldados cerca de 10 corpos-de-prova como parte integrante do projeto piloto; as principais aspirações desta etapa foram solucionar os problemas relativos à colocação dos insertos nas extremidades dos prismas, adquirir familiaridade nas leituras e manuseamento do aparelho comparador de comprimentos e ter conhecimento da metodologia a ser adotada durante os ensaios.

Após a moldagem, os prismas permaneciam cerca de 24 horas nas fôrmas para depois serem dispostos por sete dias na câmara úmida. Na Figura 5.16, encontram-se alguns exemplares dispostos na câmara úmida.



Figura 5.16 – Prismas dispostos na câmara úmida

Na Figura 5.16, observam-se os prismas dispostos sobre pequenos calços de madeira visando permitir a retração por secagem em todas as faces do elemento. Adotando este procedimento, evitou-se a retração diferencial que poderia prejudicar a avaliação dos resultados.

As fôrmas utilizadas para a moldagem dos prismas podem ser encontradas na Figura 5.17.

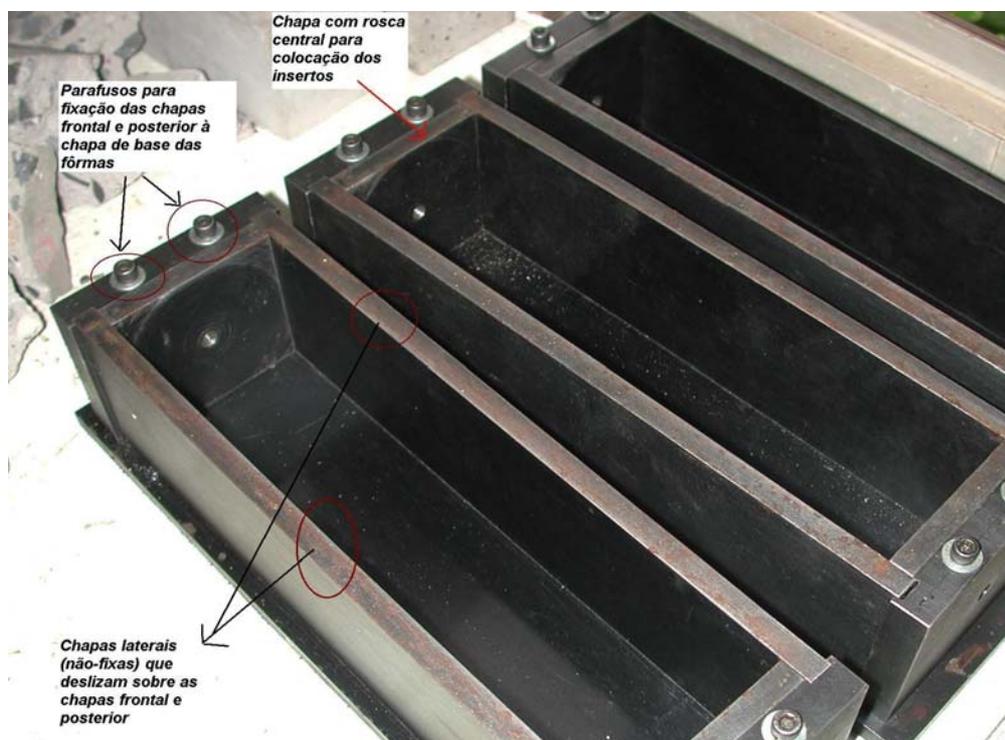


Figura 5.17 – Fôrmas utilizadas para a moldagem dos prismas

Os insertos utilizados apresentavam comprimento nominal de 19,5mm. Em virtude do comprimento da barra de referência ser maior que o preconizado pela norma, os insertos teriam que ser posicionados cada vez mais no interior da chapa central para que o comprimento final do prisma fosse similar ao da barra de referência e, dessa forma, possibilitasse a correta execução das leituras. Como consequência desse procedimento, o embutimento do inserto no concreto foi muito pequeno gerando pequena aderência, fato este que comprometeu o processo de desforma dos prismas e a perda de alguns exemplares. Como solução para esse problema, foram posicionados pequenos pedaços de arame na extremidade e executadas ranhuras ao longo do corpo do inserto visando aumentar a aderência possibilitando, dessa maneira, uma correta desforma sem perda de exemplares. Na Figura 5.18, encontram-se os insertos utilizados e alguns dos seus detalhes descritos.

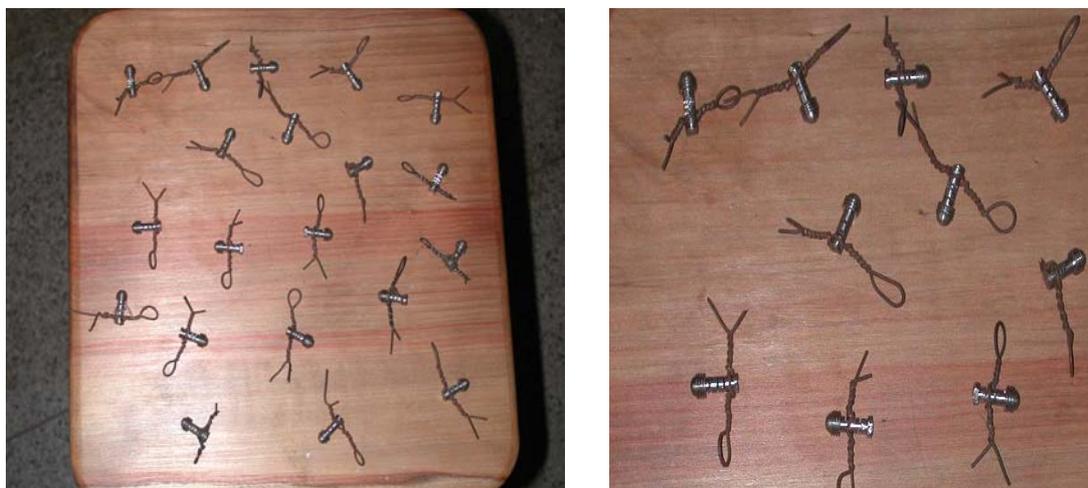


Figura 5.18 – Insertos utilizados

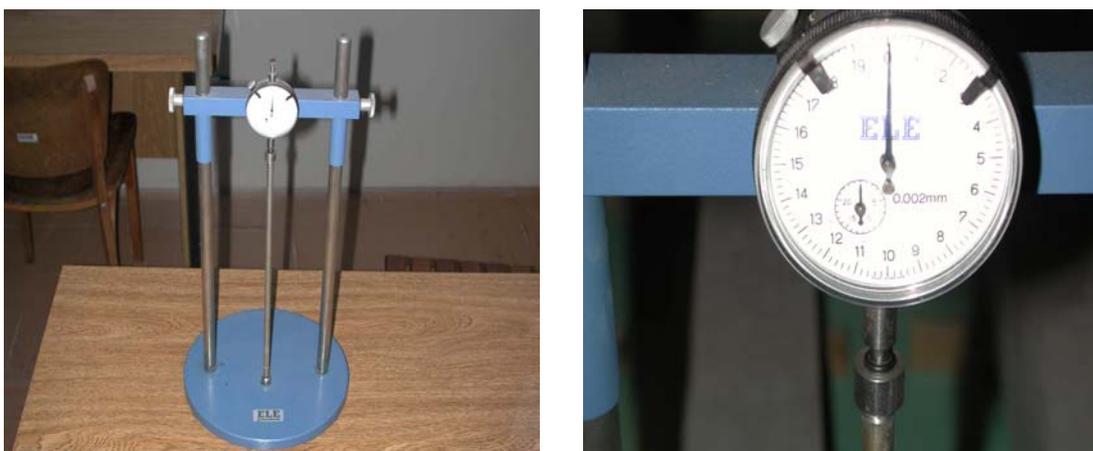
Os insertos posicionados nas fôrmas encontram-se na Figura 5.19.



Figura 5.19 – Insertos posicionados nas fôrmas

No período, entre a desforma e permanência na câmara úmida foram realizadas três leituras para avaliar o desenvolvimento da retração ou expansão inicial. Depois de decorridos sete dias na câmara úmida, os prismas foram colocados na câmara climatizada aonde eram realizadas leituras semanais.

As leituras foram executadas com o auxílio de um aparelho comparador de comprimentos, Figura 5.20.

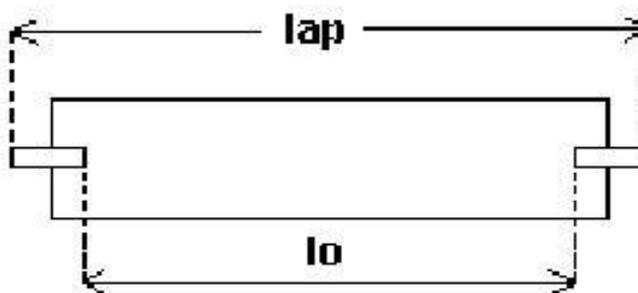


a) Aparelho comparador

b) Detalhe relógio

Figura 5.20 – Aparelho comparador de comprimentos

Como se observa na Figura 5.20, o aparelho era constituído de duas barras de aço invar (material com baixíssimo coeficiente de dilatação térmica) que sustentavam o relógio comparador de comprimentos (precisão de milésimos de milímetros – 0,002mm). A barra de referência que foi utilizada como padrão apresentava um comprimento total de $(300 \pm 1,5)$ mm sendo empregada antes de cada leitura, portanto as leituras de cada prisma referiam-se ao valor de referência da barra padrão. A leitura realizada pelo aparelho referia-se ao comprimento do prisma entre os extremos de cada inserto, entretanto, o valor que interessava para a retração era à distância entre os insertos no interior do prisma. Esta particularidade pode ser encontrada na Figura 5.21.



lap = leitura efetuada pelo aparelho

lo = leitura que será utilizada para a retração

Figura 5.21 - Diferenças entre a leitura do aparelho e àquela que será utilizada para a retração.

Para obter a leitura que seria utilizada nos cálculos de retração por secagem, subtraía-se a leitura efetuada pelo aparelho do comprimento dos dois insertos ($2 \times 19,5$ mm). Na Figura 5.22, encontra-se um prisma de referência disposto no aparelho comparador de comprimentos para que fosse realizada a leitura de retração.

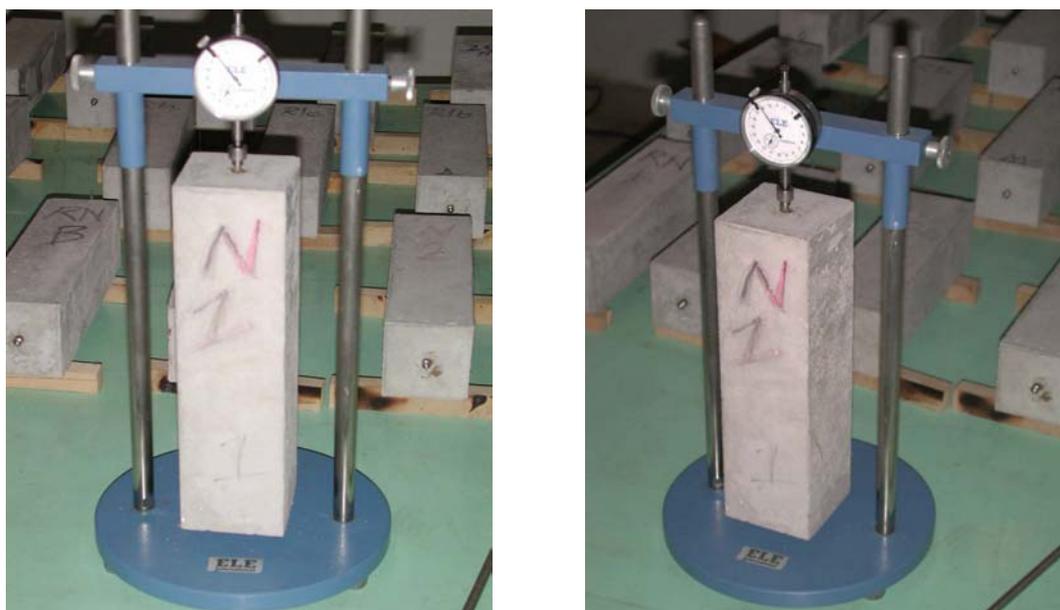


Figura 5.22 – Prisma disposto no aparelho comparador de comprimentos

Os prismas foram dispostos na câmara climatizada do Departamento de Estruturas que apresentava registro e controle da temperatura e umidade relativa do ar, Figura 5.23.



Figura 5.23 – Câmara climatizada do Departamento de Estruturas

Na Figura 5.24, apresenta-se um layout da câmara climatizada representado todos os equipamentos instalados no seu interior.

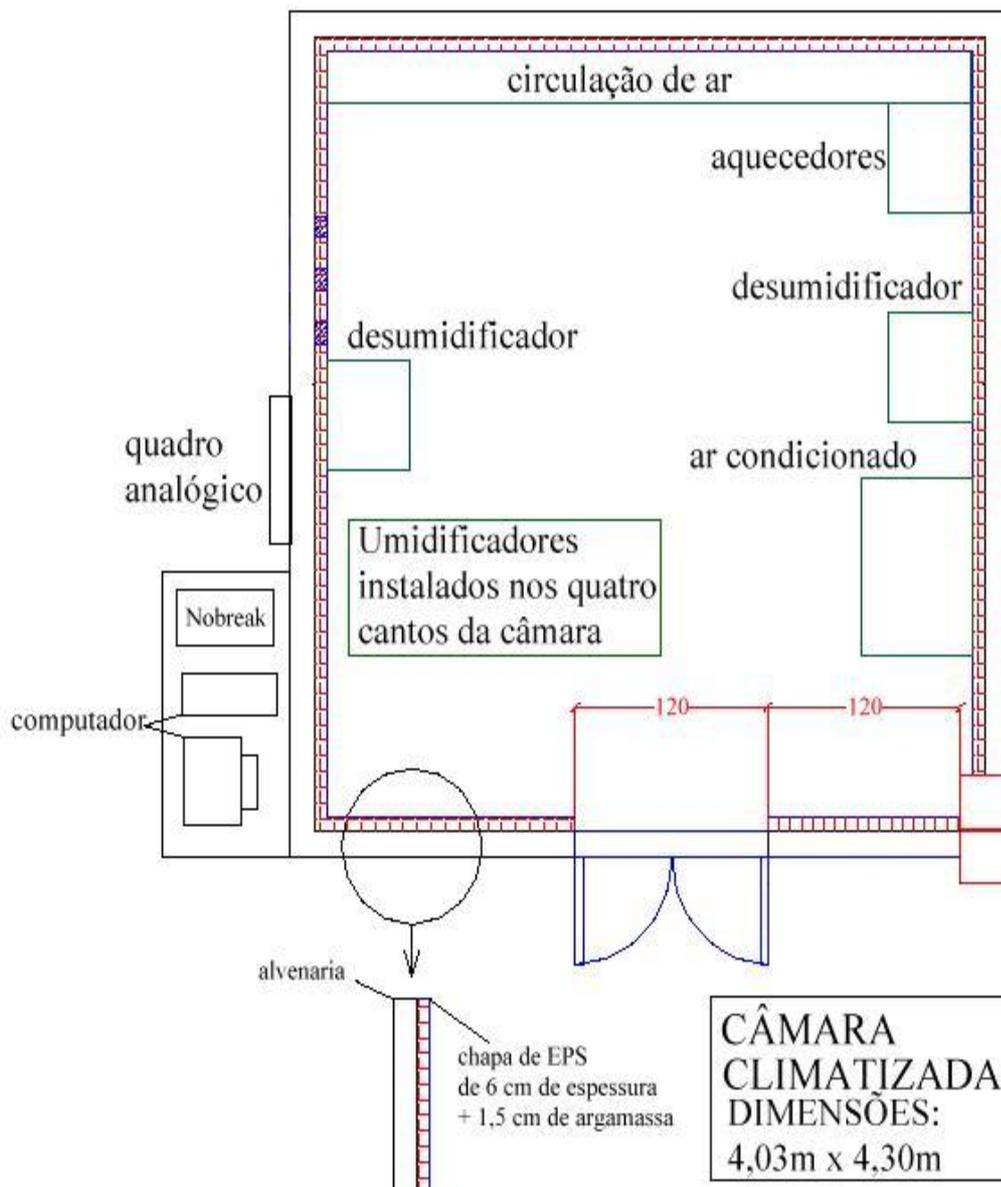


Figura 5.24 – Layout da câmara climatizada

FONTE: (TAKEUTI & HANAI, 2002)

Na Figura 5.25, observam-se com mais detalhes os equipamentos de refrigeração e aquecimento da câmara.

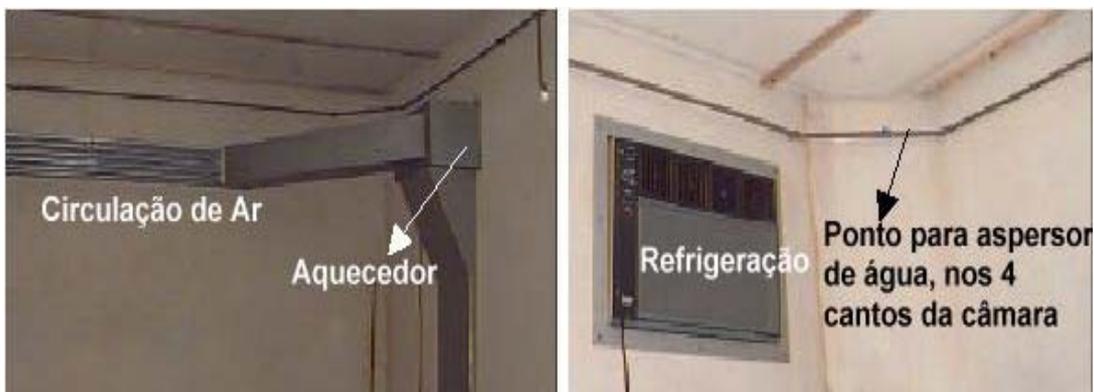


Figura 5.25 – Equipamentos de refrigeração e aquecimento da câmara

FONTE: (TAKEUTI & HANAI, 2002)

Na Figura 5.26, podem ser encontrados os desumidificadores presentes na câmara climatizada.



Figura 5.26 – Desumidificadores da câmara climatizada

Os sensores que monitoravam a temperatura e a umidade dentro da câmara climatizada são encontrados na Figura 5.27.



Figura 5.27 – Sensores da câmara climatizada

A principal tela do programa que controlava a temperatura e umidade é apresentada na Figura 5.28.

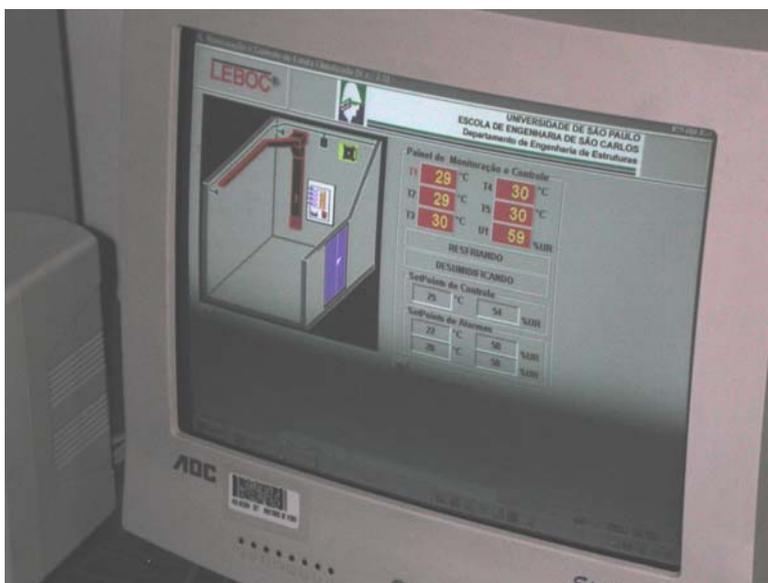


Figura 5.28 – Tela principal do programa de controle

Na Figura 5.29 são apresentados o sistema de controle (nobreak e computador) e o quadro analógico que monitoravam a umidade relativa em

um ponto e a temperatura em quatro pontos distintos do interior da câmara climatizada.



a) Sistema de controle



b) Quadro analógico

Figura 5.29 – Sistema de controle e quadro analógico

A *ASTM C157-93* recomenda que os prismas devam ser dispostos em uma câmara que apresente temperatura situada entre $(23 \pm 1,7^\circ\text{C})$ e umidade entre $(50 \pm 4\%)$. Em virtude de um problema que ocorreu no aparelho de refrigeração no início do segundo mês de ensaio, a temperatura elevou-se e ficou em torno de $31 \pm 2^\circ\text{C}$; por outro lado, a umidade sempre se manteve estabilizada nos patamares de $54 \pm 2\%$.

Na Figura 5.30, podem ser observados os prismas logo após a moldagem.



Figura 5.30 – Vista dos prismas logo após a moldagem

Os prismas dispostos na câmara climatizada podem ser observados na Figura 5.31.



Figura 5.31 – Prismas dispostos na câmara climatizada

As leituras que expressavam a expansão ou retração por secagem (ε) dos prismas foram calculadas como sendo a diferença entre os comprimentos dos prismas à idade considerada e o comprimento dos mesmos quando da remoção dos moldes, expressa em μm ($\times 10^{-6}\text{m}$).

$$\varepsilon = \left(\frac{A - B}{G} \right) \quad (5.4)$$

onde:

A= leitura efetuada numa idade qualquer em mm

B=leitura efetuada após a desforma em mm

G= Comprimento nominal de medida, variável para cada prisma

$\varepsilon < 0$ – significa que houve retração

$\varepsilon > 0$ – significa que houve expansão

As normas utilizadas para os ensaios de retração por secagem foram as normas americanas da ASTM:

- ASTM C 490-96: *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*. Designation.
- ASTM C157-93: *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. Designation.

5.3.1. RESULTADOS DA SEGUNDA FASE

Neste item serão apresentados os resultados de retração por secagem para cada concreto estudado.

5.3.1.1. CONCRETO COM AGREGADOS NATURAIS - REFERÊNCIA

As leituras efetuadas para os prismas confeccionados com agregados naturais encontram-se na Tabela 5.50.

Tabela 5.50 – Retração por secagem do concreto com agregados naturais

Nº da Leitura	Idade (dias)	Retração por secagem – prismas			Retração média
		1	2	3	
1	1	0	0	0	0
2	5	+4,8x10 ⁻⁶	+8,0x10 ⁻⁶	+6,4x10 ⁻⁶	+6,4x10 ⁻⁶
3	8	+1,5x10 ⁻⁶	+3,0x10 ⁻⁶	+4,5x10 ⁻⁶	+3,1x10 ⁻⁶
4	12	-22x10 ⁻⁶	-53x10 ⁻⁶	-55x10 ⁻⁶	-43x10 ⁻⁶
5	19	-133x10 ⁻⁶	-184x10 ⁻⁶	-182x10 ⁻⁶	-166x10 ⁻⁶
6	26	-175x10 ⁻⁶	-215x10 ⁻⁶	-217x10 ⁻⁶	-202x10 ⁻⁶
7	33	-249x10 ⁻⁶	-290x10 ⁻⁶	-293x10 ⁻⁶	-277x10 ⁻⁶
8	40	-272x10 ⁻⁶	-307x10 ⁻⁶	-308x10 ⁻⁶	-296x10 ⁻⁶
9	51	-301x10 ⁻⁶	-336x10 ⁻⁶	-340x10 ⁻⁶	-326x10 ⁻⁶
10	62	-342x10 ⁻⁶	-368x10 ⁻⁶	-376x10 ⁻⁶	-362x10 ⁻⁶
11	84	-373x10 ⁻⁶	-390x10 ⁻⁶	-399x10 ⁻⁶	-388x10 ⁻⁶
12	109	-425x10 ⁻⁶	-429x10 ⁻⁶	-441x10 ⁻⁶	-432x10 ⁻⁶

5.3.1.2. CONCRETO RECICLADO – CR1

As leituras de retração efetuadas para os prismas confeccionados com o concreto reciclado CR1 encontram-se na tabela 5.51.

Tabela 5.51 – Retração por secagem do concreto reciclado CR1

Nº da Leitura	Idade (dias)	Retração por secagem – prismas			Retração média
		1	2	3	
1	1	0	0	0	0
2	4	$-4,6 \times 10^{-6}$	$-9,2 \times 10^{-6}$	$5,4 \times 10^{-6}$	$-2,8 \times 10^{-6}$
3	8	$-7,7 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-6}$	$6,1 \times 10^{-6}$	$+1,8 \times 10^{-6}$
4	11	-108×10^{-6}	-124×10^{-6}	-100×10^{-6}	-111×10^{-6}
5	14	-203×10^{-6}	-234×10^{-6}	-194×10^{-6}	-210×10^{-6}
6	17	-280×10^{-6}	-305×10^{-6}	-268×10^{-6}	-284×10^{-6}
7	21	-366×10^{-6}	-413×10^{-6}	-348×10^{-6}	-375×10^{-6}
8	24	-382×10^{-6}	-433×10^{-6}	-361×10^{-6}	-392×10^{-6}
9	32	-452×10^{-6}	-505×10^{-6}	-432×10^{-6}	-463×10^{-6}
10	50	-514×10^{-6}	-552×10^{-6}	-506×10^{-6}	-524×10^{-6}
11	56	-541×10^{-6}	-591×10^{-6}	-533×10^{-6}	-555×10^{-6}
12	63	-600×10^{-6}	-656×10^{-6}	-583×10^{-6}	-613×10^{-6}
13	70	-625×10^{-6}	-680×10^{-6}	-603×10^{-6}	-636×10^{-6}
14	84	-666×10^{-6}	-725×10^{-6}	-648×10^{-6}	-680×10^{-6}
15	102	-685×10^{-6}	-729×10^{-6}	-675×10^{-6}	-696×10^{-6}
16	113	-727×10^{-6}	-774×10^{-6}	-713×10^{-6}	-738×10^{-6}
17	135	-741×10^{-6}	-782×10^{-6}	-728×10^{-6}	-750×10^{-6}
18	160	-764×10^{-6}	-798×10^{-6}	-751×10^{-6}	-771×10^{-6}

5.3.1.3. CONCRETO RECICLADO – CR7

As leituras de retração efetuadas para os prismas confeccionados com o concreto reciclado CR7 encontram-se na tabela 5.52.

Tabela 5.52 – Retração por secagem do concreto reciclado CR7

Nº da Leitura	Idade (dias)	Retração por secagem – prismas			Retração média
		1	2	3	
1	1	0	0	0	0
2	5	-16×10^{-6}	$-8,4 \times 10^{-6}$	-15×10^{-6}	-13×10^{-6}
3	8	$-8,4 \times 10^{-6}$	$-3,8 \times 10^{-6}$	-12×10^{-6}	$-8,2 \times 10^{-6}$
4	11	-148×10^{-6}	-149×10^{-6}	-138×10^{-6}	-145×10^{-6}
5	14	-215×10^{-6}	-242×10^{-6}	-202×10^{-6}	-220×10^{-6}
6	18	-312×10^{-6}	-353×10^{-6}	-305×10^{-6}	-323×10^{-6}
7	21	-338×10^{-6}	-379×10^{-6}	-330×10^{-6}	-349×10^{-6}
8	29	-449×10^{-6}	-493×10^{-6}	-436×10^{-6}	-459×10^{-6}
9	47	-531×10^{-6}	-581×10^{-6}	-513×10^{-6}	-541×10^{-6}
10	53	-570×10^{-6}	-624×10^{-6}	-557×10^{-6}	-584×10^{-6}
11	60	-622×10^{-6}	-667×10^{-6}	-606×10^{-6}	-632×10^{-6}
12	67	-657×10^{-6}	-706×10^{-6}	-640×10^{-6}	-668×10^{-6}
13	81	-710×10^{-6}	-754×10^{-6}	-692×10^{-6}	-718×10^{-6}
14	99	-716×10^{-6}	-765×10^{-6}	-711×10^{-6}	-731×10^{-6}
15	110	-757×10^{-6}	-804×10^{-6}	-751×10^{-6}	-771×10^{-6}
16	132	-773×10^{-6}	-830×10^{-6}	-784×10^{-6}	-796×10^{-6}
17	157	-796×10^{-6}	-859×10^{-6}	-813×10^{-6}	-823×10^{-6}

5.3.1.4. CONCRETO RECICLADO – CR28

As leituras de retração efetuadas para os prismas confeccionados com o concreto reciclado CR28 encontram-se na tabela 5.53.

Tabela 5.53 – Retração por secagem do concreto reciclado CR28

Nº da Leitura	Idade (dias)	Retração por secagem – prismas			Retração média
		1	2	3	
1	1	0	0	0	0
2	5	$6,9 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-6}$	12×10^{-6}	$7,4 \times 10^{-6}$
3	8	$-6,9 \times 10^{-6}$	$-8,4 \times 10^{-6}$	-10×10^{-6}	$-8,4 \times 10^{-6}$
4	11	-152×10^{-6}	-122×10^{-6}	-173×10^{-6}	-149×10^{-6}
5	14	-179×10^{-6}	-159×10^{-6}	-197×10^{-6}	-178×10^{-6}
6	22	-314×10^{-6}	-312×10^{-6}	-346×10^{-6}	-324×10^{-6}
7	40	-414×10^{-6}	-387×10^{-6}	-436×10^{-6}	-412×10^{-6}
8	46	-458×10^{-6}	-424×10^{-6}	-476×10^{-6}	-453×10^{-6}
9	53	-506×10^{-6}	-482×10^{-6}	-522×10^{-6}	-503×10^{-6}
10	60	-533×10^{-6}	-508×10^{-6}	-548×10^{-6}	-529×10^{-6}
11	74	-590×10^{-6}	-554×10^{-6}	-604×10^{-6}	-583×10^{-6}
12	92	-602×10^{-6}	-564×10^{-6}	-617×10^{-6}	-594×10^{-6}
13	103	-644×10^{-6}	-609×10^{-6}	-654×10^{-6}	-636×10^{-6}
14	125	-656×10^{-6}	-632×10^{-6}	-663×10^{-6}	-650×10^{-6}
15	150	-679×10^{-6}	-651×10^{-6}	-686×10^{-6}	-672×10^{-6}

5.3.1.5. CONCRETO RECICLADO – CRNA28

As leituras de retração efetuadas para os prismas confeccionados com o concreto reciclado CRNA28 encontram-se na tabela 5.54.

Tabela 5.54 – Retração por secagem do concreto reciclado CRNA28

Nº da Leitura	Idade (dias)	Retração por secagem – prismas			Retração média
		1	2	3	
1	1	0	0	0	0
2	8	-13×10^{-6}	-18×10^{-6}	-32×10^{-6}	-21×10^{-6}
3	26	-421×10^{-6}	-409×10^{-6}	-431×10^{-6}	-420×10^{-6}
4	32	-490×10^{-6}	-473×10^{-6}	-493×10^{-6}	-486×10^{-6}
5	39	-561×10^{-6}	-554×10^{-6}	-559×10^{-6}	-558×10^{-6}
6	46	-620×10^{-6}	-617×10^{-6}	-600×10^{-6}	-612×10^{-6}
7	60	-695×10^{-6}	-682×10^{-6}	-668×10^{-6}	-682×10^{-6}
8	78	-758×10^{-6}	-719×10^{-6}	-697×10^{-6}	-725×10^{-6}
9	89	-816×10^{-6}	-763×10^{-6}	-749×10^{-6}	-776×10^{-6}
10	111	-825×10^{-6}	-788×10^{-6}	-779×10^{-6}	-797×10^{-6}
11	136	-855×10^{-6}	-817×10^{-6}	-813×10^{-6}	-828×10^{-6}

5.3.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SEGUNDA FASE

Inicialmente, através das prescrições do ACI 209R-92 são apresentados os resultados teóricos esperados para cada uma das dosagens estudadas e, num segundo momento, depois de efetuada uma análise comparativa entre os resultados experimentais obtidos para os diversos concretos, os valores do ACI serão comparados com os dados experimentais. Na tabela 5.55 são apresentados os fatores de correção e suas respectivas equações.

Tabela 5.55 – Fatores de correção e suas respectivas equações

Fatores	Equação	Incógnita
γ_λ	$\gamma_\lambda = 1,40 - 0,010 \times \lambda$	λ - umidade relativa, 52%
γ_h	1,25	Espessura média, 75mm
γ_s	$\gamma_s = 0,89 + 0,00161 \times s$	s – abatimento, mm
γ_ψ	$\gamma_\psi = 0,30 + 0,014 \times \psi$	ψ - porcentagem de miúdos
γ_c	$\gamma_c = 0,75 + 0,00061 \times c$	c - consumo de cimento, kg/m ³
γ_{sh}	$\gamma_{sh} = \gamma_\lambda \times \gamma_h \times \gamma_s \times \gamma_\psi \times \gamma_c$	

Aplicando as equações da tabela 5.55 para cada uma das dosagens foram obtidos os valores dos fatores de correção, Tabela 5.56.

Tabela 5.56 – Fatores de correção para cada uma das dosagens

	γ_λ	γ_h	γ_s	γ_ψ	γ_c	γ_{sh}
Referência	0,88	1,25	0,99	0,82	1,04	0,93
CR1	0,88	1,25	0,97	0,82	1,03	0,90
CR7	0,88	1,25	1,00	0,82	1,03	0,93
CR28	0,88	1,25	0,97	0,82	1,03	0,90
CRNA28	0,88	1,25	0,97	0,82	1,03	0,90

Através da eq. (5.3), obteve-se a deformação última teórica para cada uma das dosagens estudadas, Tabela 5.57.

$$(\varepsilon_{sh})_u = 780 \times 10^{-6} \times \gamma_{sh} \quad (\text{m/m}) \quad (5.3)$$

Tabela 5.57 – Deformação última teórica para as dosagens estudadas

	$(\varepsilon_{sh})_u$
Referência	$-725 \times 10^{-6} \text{ m/m}$
CR1	$-702 \times 10^{-6} \text{ m/m}$
CR7	$-725 \times 10^{-6} \text{ m/m}$
CR28	$-702 \times 10^{-6} \text{ m/m}$
CRNA28	$-702 \times 10^{-6} \text{ m/m}$

Aplicando a formulação da eq. (5.4), foi obtida a retração em qualquer idade após o período de sete dias de cura úmida.

$$(\varepsilon_{sh})_t = \left(\frac{t}{35 + t} \right) \times (\varepsilon_{sh})_u \quad (5.4)$$

Na tabela 5.58, encontram-se os resultados teóricos de retração para cada uma das dosagens.

Tabela 5.58 – Resultados teóricos de retração aplicando as prescrições do ACI 209R-92

Idade	Referência	CR1	CR7	CR28	CRNA28
1	-19,5E-6	-20,1E-6	-19,5E-6	-20,1E-6	-20,1E-6
5	-87,8E-6	-90,6E-6	-87,8E-6	-90,6E-6	-90,6E-6
7	-117,0E-6	-120,8E-6	-117,0E-6	-120,8E-6	-120,8E-6
10	-156,0E-6	-161,1E-6	-156,0E-6	-161,1E-6	-161,1E-6
14	-200,6E-6	-207,1E-6	-200,6E-6	-207,1E-6	-207,1E-6
21	-263,3E-6	-271,9E-6	-263,3E-6	-271,9E-6	-271,9E-6
28	-312,0E-6	-322,2E-6	-312,0E-6	-322,2E-6	-322,2E-6
35	-351,0E-6	-362,5E-6	-351,0E-6	-362,5E-6	-362,5E-6
42	-382,9E-6	-395,5E-6	-382,9E-6	-395,5E-6	-395,5E-6
49	-409,5E-6	-422,9E-6	-409,5E-6	-422,9E-6	-422,9E-6
56	-432,0E-6	-446,2E-6	-432,0E-6	-446,2E-6	-446,2E-6
63	-451,3E-6	-466,1E-6	-451,3E-6	-466,1E-6	-466,1E-6
70	-468,0E-6	-483,3E-6	-468,0E-6	-483,3E-6	-483,3E-6
77	-482,6E-6	-498,4E-6	-482,6E-6	-498,4E-6	-498,4E-6
91	-507,0E-6	-523,6E-6	-507,0E-6	-523,6E-6	-523,6E-6
105	-526,5E-6	-543,8E-6	-526,5E-6	-543,8E-6	-543,8E-6

Na Tabela 5.59, são apresentados os resultados obtidos para um dos concretos avaliados nesta pesquisa.

Tabela 5.59 – Valores de retração por secagem obtidos experimentalmente

Concreto Referência		Concreto reciclado (CR1)		Concreto reciclado (CR7)		Concreto reciclado (CR28)		Concreto reciclado (CRNA28)	
Idade (dias)	ε ($\times 10^{-6}$)	Idade (dias)	ε ($\times 10^{-6}$)	Idade (dias)	ε ($\times 10^{-6}$)	Idade (dias)	ε ($\times 10^{-6}$)	Idade (dias)	ε ($\times 10^{-6}$)
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
5	6,4	4	-2,8	5	-13	5	7,4	8	-21
8	3,1	8	1,8	8	-8,2	8	-8,4	26	-420
12	-43	11	-110	11	-145	11	-149	32	-486
19	-166	14	-210	14	-220	14	-178	39	-558
26	-202	17	-284	18	-323	22	-324	46	-612
33	-277	21	-375	21	-349	40	-412	60	-682
40	-296	24	-392	29	-459	46	-453	89	-776
62	-362	32	-463	47	-541	53	-503	111	-797
84	-388	50	-523	53	-583	60	-529	136	-820
109	-420	56	-555	60	-632	74	-583		
		63	-613	67	-668	103	-636		
		70	-636	81	-718	125	-650		
		84	-680	110	-771	150	-672		
		113	-738	132	-796				
		135	-750	157	-815				
		160	-771						

Pela Figura 5.32, pode ser observado o desenvolvimento da retração por secagem para cada uma das dosagens estudadas.

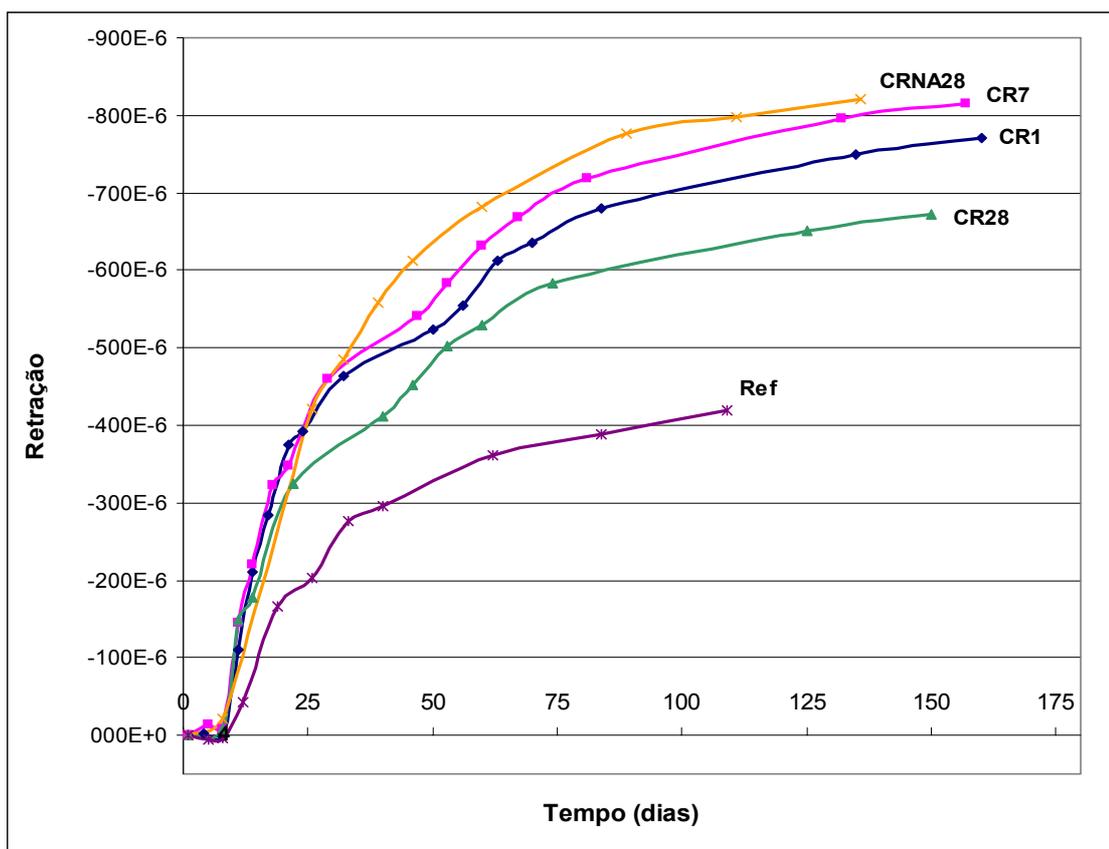


Figura 5.32 – Desenvolvimento da retração por secagem para os concretos estudados

Através da análise da Tabela 5.59 e da Figura 5.32, nota-se claramente que todas as dosagens que empregaram agregados reciclados apresentaram valores de retração superiores aos obtidos para o concreto de referência. A seguir, são apresentadas algumas justificativas que podem ser enumeradas para este comportamento:

- O menor módulo de deformação do agregado reciclado em relação ao agregado natural. Este fato se deve à grande quantidade de argamassa aderida ao reciclado que acaba, por conseguinte, oferecendo uma menor contenção à retração da pasta de cimento.

Segundo TROXELL⁴ et al apud MEHTA & MONTEIRO (1994), a substituição de um agregado com alto módulo de deformação por um agregado de baixo módulo de deformação pode ocasionar um aumento de cerca de 2,5 vezes na retração por secagem.

- A menor dimensão máxima característica do agregado reciclado em relação ao agregado natural devido às características do britador utilizado e a abertura de sua mandíbula. Segundo FURNAS (1997), a substituição de um agregado com faixa granulométrica situada entre 9,5-19mm por um agregado com granulometria entre 4,8-9,5mm ocasionou um aumento de cerca de 35% na retração por secagem.
- A maior relação água/cimento utilizada nas dosagens com reciclados para uma determinada consistência. Segundo NEVILLE (1997), a retração é tanto maior quanto maior for a relação água/cimento, pois esta determina a quantidade de água evaporável na pasta de cimento e a velocidade na qual a água pode se deslocar para a superfície do concreto. MEHTA & MONTEIRO (1994) relatam que um aumento na relação água/cimento irá reduzir o volume de agregado ocasionando, conseqüentemente, um aumento da retração por secagem.

Para ilustrar o comportamento dos resultados obtidos para a propriedade de retração por secagem, confeccionou-se um gráfico relacionando os valores obtidos para os diferentes concretos estudados (Figura 5.33). No eixo das abscissas estão indicadas as idades analisadas, enquanto nas ordenadas, procurou-se expressar cada valor obtido com relação à retração do concreto de referência.

4 TROXELL, G. E.; RAPHAEL, J. M.; DAVIS, R. E. (1958). Proceedings ASTM, v.58, p.1101-1120 apud MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. (1994). Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. Editora Pini, São Paulo.

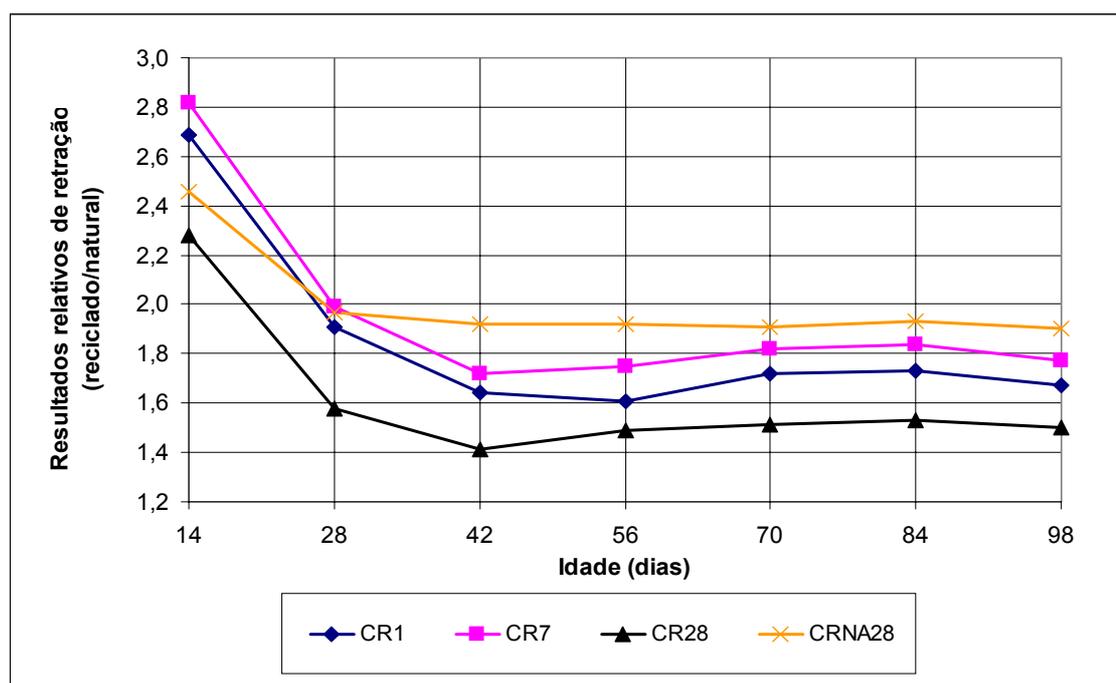


Figura 5.33 – Resultados relativos para a propriedade de retração por secagem

Analisando-se o gráfico da Figura 5.33, observa-se que os resultados mais satisfatórios foram obtidos para o concreto reciclado CR28 seguido pelo concreto CR1; a retração para esses concretos após 42 dias de secagem situou-se entre 40% a 70% superior à apresentada para o concreto de referência. Para o concreto reciclado CR7, a retração por secagem foi cerca de 75% superior, sendo que os maiores resultados de retração foram obtidos para o concreto CRNA28, com valores até 90% superiores em relação ao concreto de referência.

Os menores valores de retração por secagem para os concretos CR1 e CR28 quando comparados com os demais concretos reciclados deve-se principalmente à menor relação água/cimento empregada nessas dosagens, menor absorção e índice de vazios dos seus respectivos agregados reciclados. Por outro lado, ratificando os resultados obtidos nas propriedades físicas e mecânicas analisadas anteriormente, o concreto reciclado CRNA28

obteve os maiores valores de retração devido à qualidade do agregado reciclado e à maior relação água/cimento empregada nessa dosagem.

A maior resistência do agregado GR28 e seu maior módulo de deformação podem ser enumerados como alguns dos motivos para os menores valores de retração do concreto CR28 (cerca de 15%) em relação ao concreto CR1.

Comparando os resultados obtidos experimentalmente e os valores teóricos aplicando as prescrições do ACI 209R-92 foram observadas algumas diferenças, Figura 5.34.

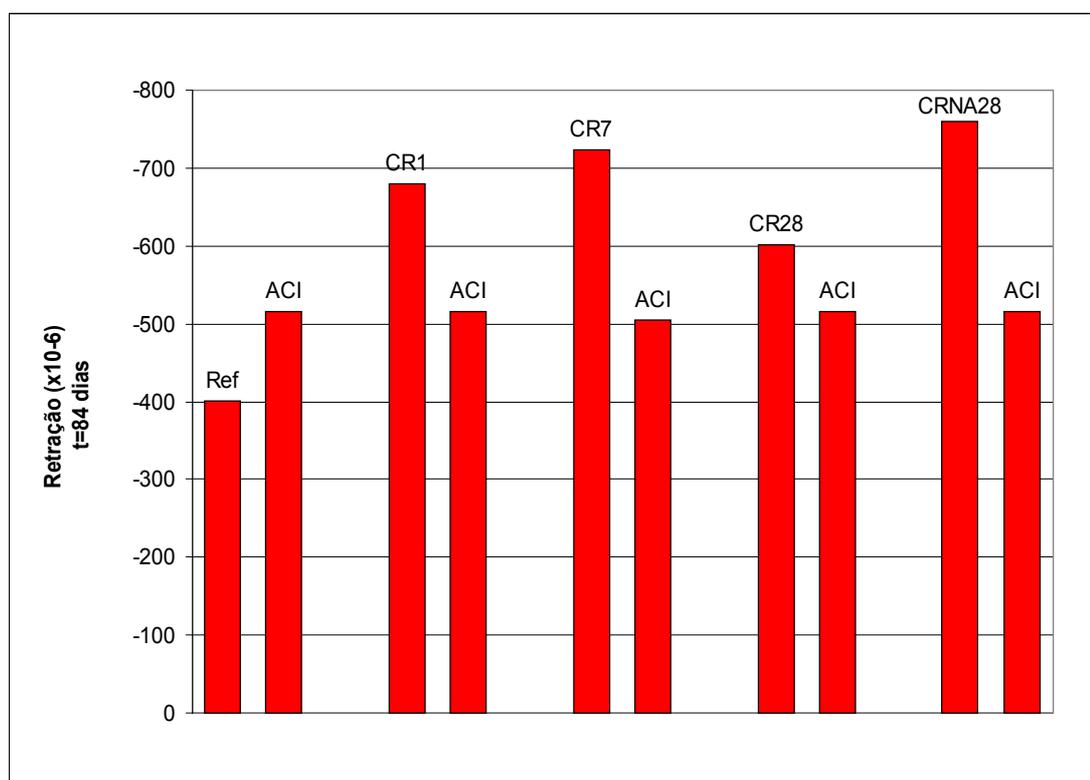


Figura 5.34 – Resultados de retração obtidos experimentalmente x Resultados teóricos do ACI

Como se observa no gráfico da Figura 5.34, as formulações do ACI 209R-92 subestimam os valores de retração para os concretos reciclados. Aplicando as formulações do ACI, o valor da retração teórica encontrada para um concreto reciclado é aproximadamente 30% inferior ao valor que foi

obtido experimentalmente. Em virtude disso, podem ser enumeradas algumas justificativas para tais diferenças:

- As prescrições do ACI209 R-92 não levam em consideração a influência das características físicas dos agregados na retração. Dentre essas características pode-se citar a porosidade, absorção de água que, no caso de agregados reciclados, desempenham papel fundamental no desenvolvimento da retração.
- O ACI 209R-92 prescreve que os exemplares devam ser acondicionados em um ambiente com temperatura situada entre $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. Entretanto, apesar do manual constatar que a temperatura é o segundo maior efeito que afeta a retração, o ACI 209R-92 não oferece nenhuma formulação tratando de temperaturas distintas da mencionada no manual. Portanto, em virtude dos prismas terem sido dispostos em um ambiente com temperatura próxima aos 32°C espera-se que os valores teóricos do ACI subestimem os valores obtidos experimentalmente.

HANSEN (1985) cita um aumento de 40 a 80% da retração por secagem para concretos reciclados. Esse fato deve-se basicamente a grande quantidade de argamassa aderida à superfície do agregado reciclado que acaba condicionando a um aumento da retração.

BOEGH & HANSEN (1985) avaliaram a retração por secagem de concretos confeccionados com agregados graúdos reciclados. Segundo os pesquisadores, foi observado um aumento de 40 a 60% da retração por secagem para o concreto reciclado em comparação com o concreto com agregados naturais.

RAVINDRARAJAH et al. (1987) obtiveram valores de retração por secagem cerca de 55% superiores para concretos com agregados graúdos

reciclados em relação ao concreto com agregados naturais. As recomendações da RILEM (1994) propõem a adoção de coeficientes de correção na ausência de valores experimentais mais precisos para elementos de concreto reciclado; por exemplo, para obter a retração de um concreto com agregados graúdos reciclados calcula-se através de alguma norma o valor da retração para o concreto com agregados naturais e, depois basta multiplicá-lo pelo coeficiente apresentado na RILEM, nesse caso 1,5.

TERANISHI et al. (1998) estabeleceram várias dosagens para concretos com agregados graúdos reciclados. Os resultados mostraram que a retração por secagem de concretos com agregados graúdos reciclados foi cerca de 30% maior para concretos com relação água/cimento igual a 0,6, 25% superior para uma relação água/cimento igual a 0,5 e cerca de 17% maior para concretos com uma relação água/cimento igual a 0,4 se comparado com a retração por secagem de concretos com agregados naturais com características similares.

SAGOE-CRENTSIL et al. (2001) estudaram a retração por secagem de concretos com agregados graúdos reciclados. Para concretos reciclados, a deformação por retração foi cerca de 35% maior se comparado com o concreto de referência. De uma maneira geral, os autores concluíram que os concretos reciclados apresentaram maiores valores de retração, devido às partículas de agregado reciclado terem menor capacidade de restrição se comparado com os agregados naturais.

POON et al. (2002) avaliaram a retração por secagem de blocos de concreto e pavimentação que empregaram agregados reciclados. As dosagens que empregaram 100% de reciclados (graúdo+miúdo) apresentaram uma retração cerca de 35% superior à obtida para o concreto de referência.

CONCLUSÃO

As conclusões obtidas foram muito satisfatórias. Os resultados obtidos na parte experimental equivaleram-se aos obtidos através da pesquisa bibliográfica. Analisando os resultados na sua totalidade, esta pesquisa concluiu:

- A qualidade do resíduo de concreto influenciou significativamente as propriedades do novo material. Quando se utilizou concretos reciclados com baixa relação água/cimento observou-se uma grande relação entre estas propriedades, vide as conclusões de RYU (2002).
- As propriedades dos agregados graúdos reciclados e dos concretos reciclados foram influenciadas pela camada de argamassa aderida à sua superfície. Esta camada foi a responsável pela alta porosidade do agregado, alta absorção e redução da massa específica.

- O processo de britagem utilizado determinou as características dos resíduos. A granulometria e a quantidade de argamassa aderida foram influenciadas pelo processo de britagem adotado.
- O processo empregado para a produção do concreto teve influência significativa nas propriedades físicas e mecânicas do concreto reciclado; a condição de umidade do agregado reciclado na mistura foi o fator determinante neste processo.
- A perda de trabalhabilidade do concreto reciclado foi maior quando comparada com o concreto de agregados naturais, pois o agregado reciclado continuou absorvendo água mesmo depois da mistura.
- A absorção dos agregados graúdos reciclados esteve dentro dos valores estipulados pelo WORKS BUREAU TECHNICAL CIRCULAR (2002). Segundo esta recomendação, o valor máximo aceitável para a absorção do agregado graúdo reciclado é de dez por cento.
- O processo de cura úmida interna que ocorreu para os concretos reciclados melhorou as propriedades da zona de transição através da hidratação de partículas remanescentes de cimento.
- As propriedades mecânicas do concreto reciclado foram influenciadas pelas características da argamassa aderida e da nova zona de transição formada.
- A resistência à compressão e tração não foram afetadas pela utilização da fração graúda reciclada. Para a resistência à compressão foi notado um ligeiro aumento no seu valor em relação ao concreto com agregados naturais. Isto pode ser explicado pelo processo de cura úmida interna, a grande quantidade de partículas não-hidratadas de cimento presente nos agregados e a qualidade do agregado reciclado.

- A retração por secagem para os concretos reciclados foi superior à retração encontrada para o concreto com agregados naturais. Entretanto, os resultados obtidos por esta pesquisa foram equivalentes aos obtidos por outros pesquisadores. Os concretos CR28 e CR1 apresentaram os resultados mais satisfatórios de retração quando comparados com os demais concretos reciclados.
- Com relação à retração por secagem dos concretos reciclados, o coeficiente de projeto (1,5) proposto pela RILEM está em concordância com os valores experimentais obtidos para os concretos avaliados.
- As prescrições do ACI209 R-92 não contemplam a influência das características físicas dos agregados na retração ocorrendo, como consequência, uma subestimação de valores. Dentre essas características pode-se citar a porosidade, absorção de água que, no caso dos agregados reciclados, desempenham papel fundamental no desenvolvimento da retração.
- Os coeficientes de projeto propostos pela RILEM (1994) para algumas propriedades dos concretos reciclados (resistência à tração, módulo de elasticidade e retração) estão em acordo com os resultados obtidos por este trabalho. Na ausência de valores experimentais, as recomendações da RILEM (1994) podem ser utilizadas sem inconvenientes.
- Os agregados reciclados apresentaram pequenas diferenças nas suas propriedades físicas quando se analisou a influência da idade de reciclagem dos resíduos de concreto. Geralmente, os resultados mais satisfatórios foram obtidos para os resíduos de concreto com pequeno grau de hidratação e, que apresentavam grande quantidade de partículas não-hidratadas de cimento. Essas partículas não-hidratadas produziram um maior empacotamento e preenchimento

dos vazios da matriz e na interface, ocasionando um efeito parede que proporcionou uma maior compacidade localizada.

- O grau de hidratação dos resíduos de concreto (idade de reciclagem) teve influência mais significativa nas propriedades mecânicas do concreto endurecido; resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade. Nestas propriedades, os concretos com agregados reciclados que apresentavam pequeno grau de hidratação e grande quantidade de cimento não-hidratado alcançaram os melhores resultados.
- Os resíduos provenientes de concretos não-adensados obtiveram os menores resultados, com exceção da propriedade de retração por secagem onde este concreto obteve os maiores resultados. Estes fatos se devem à sua alta porosidade e elevada absorção em relação aos demais reciclados.

SUGESTÕES PARA O PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA

7

Capítulo

A presente pesquisa forneceu um panorama sobre a reciclagem de concreto e a importância de se conhecer as propriedades físicas e mecânicas dos agregados e concretos reciclados; destacando-se dentre estas, a retração por secagem. Neste estudo, verificou-se também que a idade de reciclagem influencia consideravelmente as propriedades mecânicas do concreto reciclado. Entretanto, há muitos assuntos que poderão ser abordados em futuras pesquisas e, em virtude disso, são sugeridas algumas linhas de pesquisa:

- Estudo detalhado sobre a geração de resíduos de concreto nas fábricas de pré-moldados e usinas de concreto pré-misturado, identificando as etapas do processo que são mais susceptíveis à ocorrência de perdas.
- Avaliar de maneira qualitativa, os custos diretos e indiretos envolvidos na reciclagem e produção de agregados reciclados.
- Produzir agregados reciclados com diferentes granulometrias através da variação da abertura da mandíbula do britador e, averiguar as

prováveis diferenças causadas nas propriedades dos agregados e concretos reciclados com a adoção desta medida.

- Empreender um estudo visando a reutilização da água de lavagem (rica em partículas de cimento), proveniente do processo de reciclagem do concreto fresco.
- A influência dos procedimentos adotados na produção do concreto reciclado nas propriedades físicas e mecânicas do concreto.
- A influência da dosagem (rico, normal e pobre) nas propriedades dos concretos reciclados.
- A influência do tipo e composição do cimento nas propriedades do concreto reciclado. Para isso, pode-se avaliar cimentos compostos com diferentes adições (filler e pozolana) e aqueles que apresentam alta resistência inicial (ARI).
- Estudo aprofundado da microestrutura do concreto reciclado, verificando as diferenças encontradas na zona de transição pasta/agregado reciclado em relação ao concreto com agregados naturais em função da idade de reciclagem.
- Estudos conduzidos visando verificar a durabilidade do concreto reciclado frente à ação de diversos agentes.
- Estudo da retração restringida que pode ocasionar o surgimento de fissuras.
- Verificar as melhorias nas propriedades mecânicas do concreto reciclado quando se adicionam diferentes teores de sílica e aditivos.
- Estudos envolvendo a utilização de agregados reciclados para a confecção de blocos não-estruturais e estruturais de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITCIN, P. C.; NEVILLE, A. M.; ACKER, P. (1997). Integrated View of Shrinkage Deformation. *Concrete International*, p.35-41, September.
- AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ (2002). Influence of Recycled Aggregates on Mechanical Properties of HS/HPC. *Cement & Concrete Composites*, v.24, p.269-279.
- ALEXANDER, M. G. (1996). Aggregates and the Deformation Properties of Concrete. *ACI Materials Journal*. v.93, n.6, p.569-576, November-December.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1992). Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures. Designation ACI 209-R92.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1993). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. Designation C 157-93.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. Designation C 490-96.

ASSIS, C. S.; OLIVEIRA, M. E. (2001). Resíduo de Concreto: Uma Contribuição para a Revisão da Norma NBR 10004 [CD-ROM]. IN: 43^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Foz do Iguaçu, Paraná, IBRACON.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM (2001). Concretistas têm Programa de Gestão Ambiental. <http://www.abesc.org.br/meio/gestao.htm> (mar/2002).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). NBR-7211 – *Agregado para concreto.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR-6465 - *Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR-9937 - *Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR-7217 - *Agregados – Determinação da Composição Granulométrica.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). NBR-7251 – *Agregado em Estado Solto – Determinação da massa unitária.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). NBR-7810 – *Agregado em Estado Compactado Seco – Determinação da Massa Unitária.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR-5738 – Moldagem e Cura de Corpos de Prova de Concreto, Cilíndricos ou Prismáticos*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). *NBR-5739 – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos de Concreto.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). *NBR-7222 – Argamassas e Concretos – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-prova Cilíndricos.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR-9778 – Argamassas e Concretos Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão – Índice de Vazios e Massa Específica.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). *NBR-7223 – Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento de Tronco de Cone.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR-9833 – Concreto Fresco – Determinação da Massa Específica e do Teor de Ar pelo Método Gravimétrico.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR-8490 – Argamassas Endurecidas para Alvenaria Estrutural – Retração por Secagem.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). *NBR-8522 – Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama –Tensão-Deformação.*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR-10004 – Resíduos Sólidos – Classificação.*

ASSOCIATED GENERAL CONTRACTORS OF AMERICA (2001). Recycle This! <http://www.rmci-usa.com/benefits.htm> (abril/2003).

- BALLISTA, L. P. (2003). Microconcretos Leves Estruturais com Agregados Graúdos Reciclados Modificados com Látex Estireno-Butadieno – Estudo das Propriedades Físicas, Mecânicas e de Durabilidade. São Carlos, 126p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BARRA, M.; VÁZQUEZ, E. (1996). The Influence of Retained Moisture in Aggregates from Recycling on the Properties of New Hardened Concrete. *Waste Management*, v.16, n.3, p. 113-117.
- BARRA, M.; VÁZQUEZ, E. (1998). Properties of Concrete with Recycled Aggregates: Influence of Properties of the Aggregates and their Interpretation. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 19-30.
- BASTOS, P. K. X.; CINCOTTO, M. A. (2000). Retração de Compósitos à Base de Cimento. São Paulo – PCC/USP.
- BIOCYCLE (1994). Meeting the Challenge of Earthquake Recycling. *Biocycle*, p.55-57, November.
- BOEGH, E.; HANSEN, T. (1985). Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled-Aggregate Concrete. *Journal of American Concrete Institute Proceedings*, v.82, n.5, p.648-652, September-October.
- BUTTLER, A. M.; FREITAS, A. A.; SALES, A.; CORDEIRO, J. S. (2000). Gerenciamento de Lodo de ETAs – Remoção de Água Através de Leitões de Secagem e Codisposição da Fase da Sólida em Matrizes de Cimento e Resíduos da Construção Civil. *Relatório de Iniciação Científica PROSAB 2 – Tema 4*, 85p., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

- CAIRNS, R.; DI NIRO, G.; DOLARA, E. (1998). The Use of RAC in Prefabrication. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 371-380.
- COELHO, P. E. (2001). Reciclagem de Entulho – O Melhor ainda está por vir. <http://www.unilivre.org.br/centro/experiencias/experiencias/> (abr/2002).
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. *Evaluation of the Time Dependent Behavior of Concrete*. Bulletin D'Information, N° 199.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (2002). *Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002*. <http://www.conama.org.br> (dez/2002).
- CORBOLI, N. (1996). Do Caos à Solução. *Construção*, São Paulo, n.2505, p.4-7, fevereiro.
- DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (1996). *Perdas de Materiais na Construção Civil*. <http://www.pcc.usp.br/pesquisa/perdas> (mar/2002).
- DE VRIES, P. (1993). Concrete Recycled – Crushed Concrete as Aggregate. *Concrete*, p.9-13, May-June.
- DI NIRO, G.; CAIRNS, R.; DOLARA, E. (1998). Properties of Hardened RAC for Structural Purposes. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 177-188.
- DOLARA, E.; CAIRNS, R.; DI NIRO, G. (1998). RAC Prestressed Beams. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium:*

“Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”, Thomas Telford, London, p. 255-262.

EAGLE CRUSHER. <http://www.eaglecrusher.com/> (abr/2002).

ELLIOT, K. S.; MARMASH, B. E. (2000). The Properties of Recycled Precast Concrete Hollow Core Slabs for Use as Replacement Aggregate in Concrete. *Proceedings from Waste Materials in Construction WASCON 2000*, p.769-781, Harrogate, England, May-June.

FRANZONI, E.; SANDROLINI, F. (2001). Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. *Cement and Concrete Research*, v.31, n.3, p.485-489.

FRASER (2003). The Alex Fraser Group. <http://www.alexfraser.com.au>. (jan/2003).

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

FURNAS (1997). Concretos (massa, estrutural, projetado e compactado com rolo) – Ensaio e Propriedades. Editora Pini, São Paulo.

GOMEZ-SOBERÓN, J. M. (2002). Porosity of Recycled Concrete with Substitution of Recycled Concrete Aggregate. *Cement and Concrete Research*, v.32, p.1301-1311.

GONÇALVES, R. D. (2000). Agregados Reciclados de Resíduos de Concreto – Um novo Material para Dosagens Estruturais. São Carlos, 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; BERNAT, A. M.; HERRERO, V. C.; CRISTINA; HERRADOR, M. F. (2001). Investigación sobre Hormigones con Árido Reciclado. Estudios sobre Material Y

Propiedades Básicas [CD-ROM]. IN: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Foz do Iguaçu, Paraná, IBRACON.

GRÜBL, P.; NEALEN, A. (1998). Construction of an Office Building Using Concrete Made from Recycled Demolition Material. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 263-274.

HABITARE – PROGRAMA DE TECNOLOGIA EM HABITAÇÃO (2002). Alternativas para Redução do Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obras. <http://habitare.infohab.org.br> (abril/2003).

HANSEN, T. C.; HEDEGARD, S. E. (1984). Properties of Recycled Aggregate Concretes as Affected by Admixtures in Original Concretes. *Journal of American Concrete Institute Proceedings*, v.81, n.1, p.21-26, January-February.

HANSEN, T.; NARUD, H. (1983). Strength of Recycled Concrete made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. *Concrete International – Design and Construction*, v.5, n.1, p.79-83, January.

HELENE, P.; TERZIAN, P. (1993). Manual de Dosagem e Controle do Concreto, São Paulo, Pini.

KATZ, A. (2002). Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete. *Cement and Concrete Research*, p.1-9.

KIM, J. K.; LEE, C. S. (1998). Prediction of Differential Drying Shrinkage in Concrete. *Cement and Concrete Research*, v.28, n.7, p.985-994.

KIKUCHI, M.; DOSHO, Y.; NARIKAWA, M.; MIURA, T. (1998). Application of Recycled Concrete Aggregate for Structural Concrete. Part 1 – Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the*

International Symposium: “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”, Thomas Telford, London, p. 55-68.

KOHLER, G.; KURKOWSKI, H. (1998). Optimising the Use of RCA. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”*, Thomas Telford, London, p. 69-82.

KREZEL, Z. A.; McMANUS, K. J. (2000). Recycling Demolition Waste to Fight Noise Pollution. In: *4th Annual Australian Environmental Engineering Research Event*, Victor Harbor, 21-24 November.

KREZEL, Z. A.; McMANUS, K. J. (2001). Ecologically Sustainable Acoustic Barriers. In: *20th Australian Road Research Board Conference*, Melbourne, 19-21 March.

KREZEL, Z. A.; McMANUS, K. J. (2002). Recycled Aggregate Concrete Sound Absorbing Barriers for Urban Freeways. *Ecorecycle Victoria Market Development Grant – Final Report*, February.

LARRARD, F.; BELLOC, A. (1997). The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, n.94, p. 417-426, September-October.

LEITE, M. B.; PEDROZO, P. H.; DAL MOLIN, D. C. (2000). Agregado Reciclado para Concreto: Proposta de Desenvolvimento de um Método para Determinação da Taxa de Absorção do Material [CD-ROM]. IN: *42^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Fortaleza, Ceará, IBRACON.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. (2001). Influência dos Agregados Reciclados no Módulo de Elasticidade de Concretos com Agregados Convencionais e Agregados Reciclados, - da Teoria à Prática [CD-ROM]. IN: *43^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Foz do Iguaçu, Paraná, IBRACON.

- LIMBACHIYA, M. C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R. K. (1998). RCA Concrete: A Study of Properties in the Fresh State, Strength Development and Durability. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 227-238.
- MATOS, G.; WAGNER, L. (1999). Consumption of Materials in the United States 1900-1995. *US Geological Survey*.
- MESBAH, H. A.; BUYLE-BODIN, F. (1999). Efficiency of Polypropylene and Metallic Fibres on Control of Shrinkage and Cracking of Recycled Aggregate Mortars. *Construction and Building Materials*, v.13, p.439-447.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994). Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, Pini.
- MONTGOMERY, D. G. (1998). Workability and Compressive Strength Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 287-296.
- NETT21(2003). <http://nett21.unep.or.jp>. (jan/2003).
- NEVILLE, A.M. (1997). Propriedades do Concreto. 2ª edição. São Paulo, Pini.
- NOGUSHI, T.; TAMURA, M. (2001). Concrete Design Towards Complete Recycling. *Structural Concrete*, v.2, n.3, p.155-167, September.
- OKAWA, Y.; YAMAMIYA, H., NISHIBAYASHI, S. (2000). Study on the Reuse of Returned Concrete. *Magazine of Concrete Research*, v.52, n.2, p.109-115, April.
- OLSEN, T. O. (2001). Recycling of Offshore Concrete Structures. *Structural Concrete*, v.2, n.3, p.169-173, September.

- OLSEN, T. O.; HOYLAND, K. (1998). Disposal of Concrete Offshore Platforms – Are Recycling of Materials an Acceptable Option?. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”*, Thomas Telford, London, p. 471-480.
- OZTURAN, T.; CEÇEN, C. (1996). Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of Concretes with Different Strengths. *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 2, pp. 165-170.
- PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. (2002). Relative Moisture Movement Through Recycled Aggregate Concrete. *Magazine of Concrete Research*, v.54, n.5, October.
- PAOLINI, M.; KHURANA, R. (1998). Admixtures for Recycling of Waste Concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, pp. 221-229.
- PARK, S. G. (1999). Recycled Concrete Construction Rubble as Aggregate for New Concrete. *Branz Study Report SR 86*.
- PAUW, P. D.; THOMAS, P.; VYNCKE, J.; DESMYTER, J. (1998). Shrinkage and Creep of Concrete with Recycled Materials as Coarse Aggregates. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: “Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate”*, Thomas Telford, London, p.213-225.
- POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. (2002). Use of Recycled Aggregates in Moulded Concrete Bricks and Blocks. *Construction and Building Materials*, v.16, n.5, p.281-289, July.
- RASHWAN, M.S.; ABOURIZK, S. (1997). The Properties of Recycled Concrete. *Concrete International*. v.19, n.7, p.56-60. July.

- RAVINDRARAJAH, R. S.; LOO, Y. H.; TAM, T.C. (1987). Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregates in Concrete. *Magazine of Concrete Research*, v.39, n.141, p.214-220, December.
- REZENDE, L. (2001). Reciclagem de Concreto Residual em Centrais Dosadoras. http://www.abesc.org.br/meio/reciclagem_concreto.htm (mar/2002).
- REZENDE, L.; LEVY, S. M.; DJANIKIAN, J. G. (1996). Tratamento e Disposição de Concreto Residual em Centrais Dosadoras. IN: Reunião do Ibracon, 38, Ribeirão Preto, 1996. Anais, São Paulo, Ibracon, 1996, v.2, p. 499-506.
- RILEM RECOMMENDATION (1994). Specifications for Concrete with Recycled Aggregates. *Materials and Structures*, vol. 27, 557-559.
- ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. (2001). Retração por Secagem dos Concretos Leves de Alto Desempenho Modificados com Polímero [CD-ROM]. IN: 43^o CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Foz do Iguaçu, Paraná, IBRACON.
- RYU, J. S. (2002). An Experimental Study on the Effect of Recycled Aggregate on Concrete Properties. *Magazine of Concrete Research*, v.54, n.1, p.7-12, February.
- SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. (2001). Performance of Concrete made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Cement and Concrete Research*, v.31, n.5, p.707-712.
- SCHWING STETTER (2000). Reciclador de Concreto Residual [CD ROM]. Vs. 1.1, Dezembro
- SEALEY, B. J.; PHILLIPS, P. S.; HILL, G. J. (2001). Waste Management Issues for the UK Ready-Mixed Concrete Industry. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 31, pp 321-331.

- SILVA, I. J. (2000). Contribuição ao Estudo dos Concretos de Elevado Desempenho: Propriedades Mecânicas, Durabilidade e Microestrutura. São Carlos, 279p., Tese (Doutorado), Área Interunidades – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo.
- SILVA, P. F.; PITTA, A. C. (2000). A Importância da Retração Hidráulica na Durabilidade das Estruturas de Concreto [CD-ROM]. *IN: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, Fortaleza, Ceará, IBRACON.
- SOROUSHIAN, P.; TAVAKOLI, M. (1996). Strengths of Recycled Aggregate Concrete Made Using Field-Demolished Concrete as Aggregate. *Journal of American Concrete Institute Proceedings*, v.93, n.2, p.182-190, March-April.
- TAKEUTI, A. R.; HANAI, J. B. (2002). Capacidade Resistente de Pilares de Concreto Armado Pré-Carregados Reforçados por Meio de Encamisamento com Concreto de Alto Desempenho [CD-ROM]. *In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto*, Belo Horizonte, Minas Gerais, IBRACON, 14p.
- TERANISHI, K.; DOSHO, Y.; NARIKAWA, M.; KIKUSHI, M. (1998). Application of Recycled Aggregate Concrete for Structure Concrete. Part 3 – Production of Recycled Aggregate by Real-Scale Plant and Quality of Recycled Concrete Aggregate. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 69-82.
- TOMOSAWA, F.; NOGUCHI, T. (1996). Towards Completely Recyclable Concrete. In: E & F SPON. *Integrated Design and Environmental Issues in Concrete Technology*, p.263-272.

- TOPÇU, I. B. (1997). Physical and Mechanical Properties of Concretes Produced with Waste Concrete. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.12, p.1817-1823.
- TOPÇU, I. B.; GUNÇAN, N. F. (1995). Using Waste Concrete as Aggregate. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.7, p.1385-1390.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca (1996). *Diretrizes para Elaboração de Dissertações e Teses na EESC-USP*. São Carlos.
- UNIVERSIDADE LIVRE DO MEIO AMBIENTE (2001). Construção e Meio Ambiente na Inglaterra. <http://www.unilivre.org.br/> (mar/2002).
- USGS (2000). Recycled Aggregates – Profitable Resource Conservation. <http://minerals.usgs.gov/minerals> (mar/2002).
- VALVERDE, F. M. (2000). Agregados para Construção Civil. <http://www.dnpm.gov.br/suma2001/> (mar/2002).
- VAN ACKER, A. (1996). Recycling of Concrete at a Precast Concrete Plant. *BIBM*. Paris, p.55-67, juillet.
- YANAGI, K.; KASAI, Y.; KAGA, S.; ABE, M. (1998). Experimental Study on the Applicability of Recycled Aggregate Concrete to Cast-in-Place Concrete Pile. In: DHIR, R. K. et al. *Proceedings of the International Symposium: "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate"*, Thomas Telford, London, p. 359-369.
- WORKS BUREAU TECHNICAL CIRCULAR (2002). Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates. <http://www.wb.gov.hk/circular/data/2002/wb1202.doc> (abr/2002).