GINO RICCI

**ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CONCRETO
COMPACTADO COM ROLO COM AGREGADOS RECICLADOS DE
CONSTRUÇÃO E DE DEMOLIÇÃO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

São Paulo

Exemplar original: 2007

Exemplar revisado: 2007

GINO RICCI

engenheiro civil, FAAP, 1981

**ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CONCRETO
COMPACTADO COM ROLO COM AGREGADOS RECICLADOS DE
CONSTRUÇÃO E DE DEMOLIÇÃO PARA PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. José Tadeu Balbo

São Paulo

Exemplar original: 2007

Exemplar revisado: 2007

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

São Paulo, 20 de agosto de 2007-08-20

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Ricci, Gino

Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação. São Paulo, 2007.

196 p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Concreto Compactado com Rolo 2. Agregados Reciclados de Entulho de Construção e Demolição
3. Pavimentos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Estrutura do trabalho	4
2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DE DEMOLIÇÃO (RCD)	6
2.1 Breve histórico	8
2.2 Pavimentação no Brasil com utilização de agregados reciclados	11
2.3 Processamento do agregado reciclado de RCD no Brasil.....	14
2.3.1 Cominuição	14
2.3.2 Separação por granulometria	14
2.3.3 Concentração	15
2.4. Procedimento de amostragem de agregados reciclados.....	17
2.5. Separação densitária dos agregados reciclados graúdos de RCD	19
3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)	22
3.1 Conceituação.....	22
3.2 Histórico.....	24
3.3 As vantagens do CCR em vista das tradicionais bases cimentadas	26
3.4 Algumas aplicações de agregados reciclados em pavimentos de concreto	31
3.5 Dosagem do CCR.	32
3.5.1 Caracterização dos componentes	33
3.5.1.1 Cimento Portland	33
3.5.1.2 Agregados naturais britados.....	34
3.5.1.3 Água.....	35
3.6 Principais estudos com CCR realizados no Brasil	35
3.7 Estudos sobre CCR com agregados reciclados	41
4 METODOLOGIA E MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA	46
4.1 Principais procedimentos de dosagem	48
4.1.1 Definição do padrão de resistência em função do projeto.....	48
4.1.2 Escolha do tipo de cimento empregado	49
4.1.3 Definição da distribuição granulométrica apropriada.....	49
4.1.4 Definição do consumo de cimento	51
4.2 Corpos de prova com dimensões reduzidas e energia de compactação.....	53
4.3 Coleta de amostras representativas dos agregados reciclados.	55
4.4 Cálculo da massa mínima da amostra – Teoria de Pierre Gy	58
4.4.1 Determinação de Q (fator de composição mineralógica)	58
4.4.2 Determinação de I (fator de liberação do mineral, adimensional)....	59
4.4.3 Determinação de f (fator de forma do mineral, adimensional).....	59
4.4.4 Determinação de h (fator de distribuição de tamanho das partículas, adimensional).....	59
4.4.5 Equação geral da teoria de Pierre Gy	60
4.5 Separação densitária dos agregados reciclados graúdos de RCD	60
4.6 Cimento Portland	66

4.7 Agregados naturais britados	66
4.8 Água	68
4.9 Agregados reciclados	68
4.10 Dosagem do CCR.....	74
4.11 Preparação dos corpos de prova.....	100
4.12 Cura dos corpos-de-prova	102
4.13 Execução dos ensaios.....	103
4.13.1 Resistência à compressão simples	103
4.13.2 Resistência à tração na flexão	104
4.13.3 Módulo de elasticidade.....	104
4.13.4 Módulo de elasticidade por propagação de onda ultra-sônica ...	105
4.13.5 Determinação da absorção de água, massa específica e porosidade	107
4.13.6 Determinação da absorção de água por capilaridade	109
4.13.7 Modificações granulométricas dos agregados	110
4.13.7.1 Índice de degradação dos agregados	110
4.13.7.2 Coeficiente de uniformidade.....	113
5 RESULTADOS OBTIDOS.....	114
5.1 Definição do consumo de cimento do CCR*	114
5.2 Definição do consumo de cimento do CCR com agregados reciclados	115
5.2.1 Para o CCR1	116
5.2.2 Para o CCR3	117
5.2.3 Para o CCR4	118
5.2.4 Para o CCR4 - 100%.....	119
5.3 Definição das dosagens de acordo com os consumos de cimento obtidos	120
5.3.1 Dosagem para o CCR*	120
5.3.2 Dosagem para o CCR1	120
5.3.3 Dosagem para o CCR3	122
5.3.4 Dosagem para o CCR4	123
5.3.5 Dosagem para o CCR4 - 100%.....	125
5.4 Traços finais do CCR de acordo com o agregado utilizado	126
5.5 Resultados da resistência à compressão	127
5.5.1 Resistência à compressão do CCR*	127
5.5.2 Resistência à compressão do CCR1.....	128
5.5.3 Resistência à compressão do CCR3.....	128
5.5.4 Resistência à compressão do CCR4.....	129
5.5.5 Resistência à compressão do CCR4 – 100%.....	129
5.6 Resultados da resistência à tração na flexão	130
5.6.1 Resistência à tração na flexão do CCR*	130
5.6.2 Resistência à tração na flexão do CCR1.....	130
5.6.3 Resistência à tração na flexão do CCR3.....	131
5.6.4 Resistência à tração na flexão do CCR4.....	131
5.6.5 Resistência à tração na flexão do CCR4 – 100%.....	132
5.7 Módulo de elasticidade	132
5.7.1 Diagrama tensão-deformação do CCR*	132
5.7.2 Diagrama tensão-deformação do CCR com agregados reciclados	133
5.8 Módulo de elasticidade com utilização de onda ultra-sônica	135
5.9 Determinação da absorção de água, massa específica e porosidade ..	135

5.10	Determinação da absorção de água por capilaridade	136
5.11	Modificações granulométricas dos agregados.....	137
5.11.1	Índice de degradação dos agregados	137
5.11.1.1	Índice de degradação do CCR*	138
5.11.1.2	Índice de degradação do CCR1	139
5.11.1.3	Índice de degradação do CCR3	140
5.11.1.4	Índice de degradação do CCR4	141
5.11.1.5	Índice de degradação do CCR4 - 100%	142
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	143
6.1	Consumo de cimento dos CCR estudados	143
6.2	Resistência à compressão dos CCR	144
6.3	Resistência à tração na flexão dos CCR	150
6.4	Módulo de elasticidade dos CCR	156
6.5	Modificações granulométricas dos CCR.....	160
6.6	Porosidade dos concretos	162
6.7	Absorção de água dos CCR	164
6.8	Discussão dos resultados	168
7	CONCLUSÕES	177
	Recomendações para estudos futuros	179
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	181

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Separação magnética dos materiais ferrosos	16
Figura 2.2: Agregados estocados em pilhas de acordo com a sua granulometria	16
Figura 3.1: Vista geral do traçado geométrico da estrada da Serra do Rio do Rastro.....	37
Figura 3.2: Absorção dos vários tipos de agregados utilizados na composição do CCR (adaptado de Cho e Yeo 2004)	42
Figura 3.3: Massa específica dos vários tipos de agregados utilizados na composição do CCR (adaptado de Cho e Yeo 2004)	43
Figura 3.4: Resultados de CHO e YEO (2004) para a resistência à compressão aos 7 dias para CCR com agregados de RCD com diferentes porcentagens de impurezas	44
Figura 4.1: Curvas granulométricas para dimensão máxima característica de 25 mm (Pittman <i>et al</i> , 1998)	50
Figura 4.2: Lote 1 - placas de concreto.....	56
Figura 4.3: Lote 2 - estrutura do posto	56
Figura 4.4: Lote 3 – material misto.....	56
Figura 4.5: Lote 4 – material cerâmico.....	56
Figura 4.6: Lote 5 – material cerâmico.....	56
Figura 4.7: Lote 1 – início de coleta	57
Figura 4.8: Lote 2 – lançamento dos incrementos	57
Figura 4.9: Lote 3 – amostra coletada	58
Figura 4.10: Lote 3 – amostra ensacada	58
Figura 4.11: Lote 5 – brita coletada	58
Figura 4.12: Equipamento <i>Sink and Float</i>	61
Figura 4.13: Lote 1- Dosagem de CCR com Agregados Reciclados	61
Figura 4.14: Lote 2 - Dosagem de CCR com Agregados Reciclados	62
Figura 4.15: Lote 3 - Dosagem de CCR com Agregados Reciclados	62
Figura 4.16: Lote 4 - Dosagem de CCR com Agregados Reciclados	62
Figura 4.17: Lote 5 - Dosagem de CCR com Agregados Reciclados	63
Figura 4.18: Lançamento lento e uniforme dos Agregados Reciclados	64
Figura 4.19: Eliminação dos resíduos de ferro-silício da amostra.....	64
Figura 4.20: Materiais que afundaram no cilindro superior do <i>Sink and Float</i>	65
Figura 4.21: Curva granulométrica da areia.....	67
Figura 4.22: Curva granulométrica da brita zero	67
Figura 4.23: Curva granulométrica da brita 1	67
Figura 4.24: Curva granulométrica da brita 2.....	68
Figura 4.25: Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 1	70
Figura 4.26: Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 2	71
Figura 4.27: Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 3	71
Figura 4.28: Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 4	72
Figura 4.29: Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 5	72
Figura 4.30: Curva granulométrica da brita 0 reciclada e natural na razão de 50% - Amostra 1	73
Figura 4.31: Curva granulométrica da brita 0 reciclada e natural na razão de 50% - Amostra 3	73

Figura 4.32: Curva granulométrica da brita 0 reciclada e natural na razão de 50% - Amostra 4	73
Figura 4.33: CCR com agregado reciclado amostra 4 com umidade 12%	74
Figura 4.34: Agregados naturais e reciclados após secagem em estufa	75
Figura 4.35: CCR1 com umidade 8,4%	76
Figura 4.36: CCR3 com umidade 8,8%	77
Figura 4.37: CCR4 com umidade 8,9%	77
Figura 4.38: CCR4 – 100% com umidade 10%	77
Figura 4.39: Curva de compactação para o CCR* com consumo de cimento de 90 kg/m ³	78
Figura 4.40: Curva granulométrica obtida para o CCR* com consumo de cimento de 90 kg/m ³	79
Figura 4.41: Curva de compactação para o CCR* com consumo de cimento de 110 kg/m ³	80
Figura 4.42: Curva granulométrica obtida para CCR* com consumo de cimento de 110 kg/m ³	81
Figura 4.43: Curva de compactação para o CCR* com consumo de cimento de 130 kg/m ³	82
Figura 4.44: Curva granulométrica obtida para CCR* com consumo de cimento de 130 kg/m ³	83
Figura 4.45: Curva de compactação para o CCR1 com consumo de cimento de 110 kg/m ³	84
Figura 4.46: Curva granulométrica obtida para CCR1 com consumo de cimento de 110 kg/m ³	85
Figura 4.47: Curva granulométrica obtida para CCR1 com consumo de cimento de 130 kg/m ³	86
Figura 4.48: Curva granulométrica obtida para CCR1 com consumo de cimento de 150 kg/m ³	87
Figura 4.49: Curva de compactação para o CCR3 com consumo de cimento de 110 kg/m ³	88
Figura 4.50: Curva granulométrica obtida para CCR3 com consumo de cimento de 110 kg/m ³	89
Figura 4.51: Curva granulométrica obtida para CCR3 com consumo de cimento de 130 kg/m ³	90
Figura 4.52: Curva granulométrica obtida para CCR3 com consumo de cimento de 150 kg/m ³	91
Figura 4.53: Curva de compactação para o CCR4 com consumo de cimento de 110 kg/m ³	92
Figura 4.54: Curva granulométrica obtida para CCR4 com consumo de cimento de 110 kg/m ³	93
Figura 4.55: Curva granulométrica obtida para CCR4 com consumo de cimento de 130 kg/m ³	94
Figura 4.56: Curva granulométrica obtida para CCR4 com consumo de cimento de 150 kg/m ³	95
Figura 4.57: Curva de compactação para o CCR4 – 100% com consumo de cimento de 110 kg/m ³	96
Figura 4.58: Curva granulométrica obtida para CCR4 – 100% com consumo de cimento de 110 kg/m ³	97
Figura 4.59: Curva granulométrica obtida para CCR4 – 100% com consumo de cimento de 130 kg/m ³	98

Figura 4.60: Curva granulométrica obtida para CCR4 – 100% com consumo de cimento de 150 kg/m ³	99
Figura 4.61: Detalhe da moldagem de corpo de prova prismático para determinação da resistência à tração na flexão – dimensões reduzidas.....	101
Figura 4.62: Corpos de prova moldados com dimensões reduzidas	102
Figura 4.63: Cura em câmara úmida	102
Figura 4.64: Ensaio para determinação da resistência à compressão simples.....	103
Figura 4.65: Ensaio para determinação da resistência à tração na flexão.....	104
Figura 4.66: Ensaio para determinação do módulo de elasticidade.....	105
Figura 4.67: Calibração com utilização da barra cilíndrica de aço com 25,7µs	106
Figura 4.68: Determinação da velocidade de propagação de ondas por transmissão direta	106
Figura 4.69: Recipientes com (5±1) mm de água	110
Figura 4.70: Detalhe do suporte para os CP	110
Figura 4.71: Betoneira utilizada para todas as misturas para todos os ensaios.....	112
Figura 5.1: CCR* – definido 110 kg/m ³ de consumo de cimento	115
Figura 5.2: CCR1 – definido 125 kg/m ³ de consumo de cimento.....	116
Figura 5.3: CCR3 – definido 120 kg/m ³ de consumo de cimento.....	117
Figura 5.4: CCR4 – definido 120 kg/m ³ de consumo de cimento.....	118
Figura 5.5: CCR4 – 100% – definido 125 kg/m ³ de consumo de cimento.....	119
Figura 5.6: Curva granulométrica obtida para CCR1 com consumo de cimento 125 kg/m ³	121
Figura 5.7: Curva granulométrica obtida para CCR3 com consumo de cimento 120 kg/m ³	123
Figura 5.8: Curva granulométrica obtida para CCR4 com consumo de cimento 120 kg/m ³	124
Figura 5.9: Curva granulométrica obtida para CCR4 – 100% com consumo de cimento 125 kg/m ³	126
Figura 5.10: Diagrama tensão-deformação para o CCR*	133
Figura 5.11: Diagrama tensão-deformação para o CCR1	133
Figura 5.12: Diagrama tensão-deformação para o CCR3.....	134
Figura 5.13: Diagrama tensão-deformação para o CCR4.....	134
Figura 5.14: Diagrama tensão-deformação para o CCR4 – 100%.....	134
Figura 5.15: Curvas granulométricas do CCR*	138
Figura 5.16: Curvas granulométricas do CCR1	139
Figura 5.17: Curvas granulométricas do CCR3	140
Figura 5.18: Curvas granulométricas do CCR4	141
Figura 5.19: Curvas granulométricas do CCR4 – 100%	142
Figura 6.1: Gráfico consumo de cimento x resistência à tração na flexão para todos os CCR estudados	144
Figura 6.2: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à compressão aos 7 dias para CCR com agregados naturais britados	146
Figura 6.3: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à compressão aos 28 dias para CCR com agregados naturais britados	148
Figura 6.4: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à compressão aos 7 dias para CCR com agregados de RCD.....	149
Figura 6.5: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à compressão aos 28 dias para CCR com agregados de RCD.....	150

Figura 6.6: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à tração na flexão aos 7 dias para CCR com agregados naturais britados	152
Figura 6.7: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à tração na flexão aos 28 dias para CCR com agregados naturais britados	153
Figura 6.8: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à tração na flexão aos 7 dias para CCR com agregados de RCD	154
Figura 6.9: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à tração na flexão aos 28 dias para CCR com agregados de RCD	155
Figura 6.10: Resultados de diversos autores para o módulo de elasticidade aos 28 dias para CCR com agregados naturais britados	158
Figura 6.11: Resultados de diversos autores para o módulo de elasticidade aos 28 dias para CCR com agregados de RCD	159
Figura 6.12: Resultados dos módulos de elasticidade por propagação de onda ultra-sônica aos 28 dias do presente trabalho	160
Figura 6.13: Resultados de diversos estudos para a porosidade do CCR com agregados naturais britados	163
Figura 6.14: Resultados de presente estudo para a porosidade do CCR com agregados reciclados de RCD	164
Figura 6.15: Resultados de diversos estudos para a absorção do CCR com agregados naturais britados	165
Figura 6.16: Resultados do presente estudo, para a absorção do CCR com agregados reciclados de RCD	165
Figura 6.17: Correlação entre a porosidade e o módulo de elasticidade dinâmica dos CCR estudados	170
Figura 6.18: Correlação entre massa específica aparente seca e o módulo de elasticidade dinâmica dos CCR estudados	171
Figura 6.19: Correlação entre massa específica aparente seca e a porosidade dos CCR estudados	171
Figura 6.20: Correlação entre os módulos de elasticidade estáticos e os módulos de elasticidade dinâmicos dos CCR estudados	172
Figura 6.21: Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico	173
Figura 6.22: Correlação entre a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade dinâmico dos CCR estudados	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Preços da tabela da PMSP – jan/2007	12
Tabela 2.2: Composição de preços da tabela da PMSP – jan/2007	13
Tabela 3.1: Resultados obtidos para BGTC.....	36
Tabela 3.2: Resistência à compressão do CCR empregado na estrada da Serra do Rio do Rastro	37
Tabela 3.3: Principais resultados obtidos por Diaz (1993) com CCR com consumo de cimento de 80 kg/m ³	38
Tabela 3.4: Principais resultados obtidos por Diaz (1993) com CCR com consumo de cimento de 120 kg/m ³	38
Tabela 3.5: Principais resultados obtidos por Trichês (1993) com CCR com consumo de cimento de 80 kg/m ³	39
Tabela 3.6: Principais resultados obtidos por Trichês (1993) com CCR com consumo de cimento de 120 kg/m ³	40
Tabela 3.7: Principais resultados obtidos por Abreu (2002).....	41
Tabela 3.8: Dosagem do CCR	41
Tabela 3.9: Resultados obtidos para o CCR com diferentes composições de agregados miúdos	41
Tabela 3.10: Resistências obtidas para o CCR com diferentes quantidades de materiais estranhos ao concreto	43
Tabela 4.1 Resultados de resistência à tração na flexão <i>versus</i> consumo de cimento de estudos anteriores	51
Tabela 4.2: Massa retida na peneira 4,8 mm.....	65
Tabela 4.3: Amostras escolhidas: 1, 3 e 4	65
Tabela 4.4: Resultados dos ensaios de caracterização química do cimento	66
Tabela 4.5: Resultados dos ensaios de caracterização física do cimento	66
Tabela 4.6: Índices físicos dos agregados naturais britados utilizados.....	68
Tabela 4.7: Porcentagem de material retida na peneira 4,8 mm - Amostra 1	69
Tabela 4.8: Porcentagem de material retido na peneira 4,8 mm - Amostra 3	69
Tabela 4.9: Porcentagem de material retido na peneira 4,8 mm - Amostra 4	69
Tabela 4.10: Principais características físicas dos agregados reciclados.....	73
Tabela 4.11: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR* com consumo de cimento de 90 kg/m ³ e principais características físicas.....	79
Tabela 4.12: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR* com consumo de cimento de 110 kg/m ³ e principais características físicas.....	81
Tabela 4.13: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR* com consumo de cimento de 130 kg/m ³ e principais características físicas.....	83
Tabela 4.14: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR1 com consumo de cimento de 110 kg/m ³ e principais características físicas.....	85
Tabela 4.15: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR1 com consumo de cimento de 130 kg/m ³ e principais características físicas.....	86
Tabela 4.16: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR1 com consumo de cimento de 150 kg/m ³ e principais características físicas.....	87

Tabela 4.17: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR3 com consumo de cimento de 110 kg/m ³ e principais características físicas.....	89
Tabela 4.18: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR3 com consumo de cimento de 130 kg/m ³ e principais características físicas.....	90
Tabela 4.19: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR3 com consumo de cimento de 150 kg/m ³ e principais características físicas.....	91
Tabela 4.20: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 com consumo de cimento de 110 kg/m ³ e principais características físicas.....	93
Tabela 4.21: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 com consumo de cimento de 130 kg/m ³ e principais características físicas.....	94
Tabela 4.22: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 com consumo de cimento de 150 kg/m ³ e principais características físicas.....	95
Tabela 4.23: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 – 100% com consumo de cimento de 110 kg/m ³ e principais características físicas.....	97
Tabela 4.24: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 – 100% com consumo de cimento de 130 kg/m ³ e principais características físicas.....	98
Tabela 4.25: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 – 100% com consumo de cimento de 150 kg/m ³ e principais características físicas.....	99
Tabela 4.26: Confronto dos resultados obtidos para corpos-de-prova com medidas convencionais e reduzidas.....	101
Tabela 5.1: Resultados obtidos para o CCR*	114
Tabela 5.2: Resultados obtidos para o CCR1.....	116
Tabela 5.3: Resultados obtidos para o CCR3.....	117
Tabela 5.4: Resultados obtidos para o CCR4.....	118
Tabela 5.5: Resultados obtidos para o CCR4 – 100%.....	119
Tabela 5.6: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR1 com consumo de cimento de 125 kg/m ³ e principais características físicas.....	121
Tabela 5.7: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR3 com consumo de cimento de 120 kg/m ³ e principais características físicas.....	122
Tabela 5.8: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 com consumo de cimento de 120 kg/m ³ e principais características físicas.....	124
Tabela 5.9: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 – 100% com consumo de cimento de 125 kg/m ³ e principais características físicas.....	125
Tabela 5.10: Traços em massa definidos para os ensaios de avaliação das propriedades do CCR.....	127
Tabela 5.11: Resultados da resistência à compressão do CCR*.....	127
Tabela 5.12 Resultados da resistência à compressão do CCR1	128

Tabela 5.13 Resultados da resistência à compressão do CCR3	128
Tabela 5.14 Resultados da resistência à compressão do CCR4	129
Tabela 5.15 Resultados da resistência à compressão do CCR4 – 100%	129
Tabela 5.16 Resultados da resistência à tração na flexão do CCR*	130
Tabela 5.17 Resultado da resistência à tração na flexão do CCR1	130
Tabela 5.18 Resultado da resistência à tração na flexão do CCR3	131
Tabela 5.19 Resultado da resistência à tração na flexão do CCR4	131
Tabela 5.20 Resultado da resistência à tração na flexão do CCR4 – 100%	132
Tabela 5.21: Resultados do módulo de elasticidade com onda ultra-sônica	135
Tabela 5.22: Resultados obtidos para absorção de água, massa específica e porosidade	136
Tabela 5.23: Resultados obtidos para absorção de água por capilaridade	136
Tabela 6.1: Resistência à compressão dos CCR estudados	144
Tabela 6.2: Resistência à tração na flexão dos CCR estudados	151
Tabela 6.3: Módulo de elasticidade dos CCR estudados	156
Tabela 6.4: Índices de degradação de cada etapa dos CCR estudados (%)....	161
Tabela 6.5: Coeficientes de uniformidade de cada etapa dos CCR estudados	162
Tabela 6.6: Porosidade dos CCR estudados	163
Tabela 6.7: Massa específica aparente seca máxima, absorção, porosidade e umidade dos CCR	166
Tabela 6.8: Massa específica aparente seca e absorção dos agregados utilizados nos CCR.....	166
Tabela 6.9: Absorção por capilaridade dos CCR do presente estudo	167
Tabela 6.10 Simulação de deformações e tensões para pavimentos rígido- híbridos com o ELSYM5.....	174

RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a utilização do agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil e demolição, na execução do concreto compactado com rolo (CCR) como base de pavimento asfáltico ou de concreto, comparando suas características mecânicas com o CCR executado com agregado natural britado.

O uso de resíduo da construção civil na Europa é muito comum devido a questões ambientais. No Brasil, somente a partir de 2002, o Conselho Nacional do Meio Ambiente estabeleceu as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil através da Resolução CONAMA nº 307.

O agregado reciclado estudado na pesquisa está em conformidade com a primeira norma brasileira vigente NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

Foram utilizados agregados reciclados coletados de uma usina de reciclagem sendo posteriormente amostrados e caracterizados de acordo com suas massas específicas para verificar a sua influência no comportamento mecânico dos concretos. Os agregados minerais convencionais são procedentes da britagem de granito. O cimento utilizado foi do tipo CP III 40 RS. Após a mistura e cura dos corpos-de-prova foram realizados ensaios de índices físicos e de caracterização mecânica, comparando-se os resultados com o CCR convencional de forma a analisar o potencial de utilização e a viabilidade técnica destes materiais.

A oportunidade de mais uma alternativa de uso dos agregados reciclados de resíduos de demolição e construção (RCD) e uma alternativa de pavimento de baixo custo utilizando técnicas de dosagens consagradas para o concreto compactado com rolo (CCR) é que motivou a realização deste trabalho.

ABSTRACT

This thesis work seeks the study of rolled compacted concrete (RCC) mixtures employing recycled waste aggregate from civil construction and demolitions as alternative for asphalt or concrete pavement bases, comparing some mechanical and physical characteristics to traditional virgin stone aggregate RCC.

It is usual the use of recycled waste aggregate in Europe due to environmental regulations. In Brazil, since 2002 the Environmental Federal Council fixed the rules and procedures for management of civil construction waste material (CONAMA resolution n. 307).

For the research the recycled waste aggregate was in full conformity to the Brazilian standard NBR 15116. The recycled waste material was collected from a recycling plant and its physical properties then defined in order to verify its implications on RCC mechanical responses. The comparative RCC was manufactured from granite crushed stone. Portland Cement type CPIII 40 RS was employed for all mixtures. Suitability and mechanical potential for RCC mixtures were evaluated through conventional physical and mechanical tests.

The main motivation for the study was to find out an alternative for using recycled waste material from civil construction and demolition as well the seek for low cost concrete alternatives using the widespread RCC technology for paving.

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte é um capital social básico. Os diversos setores da produção brasileira dependem dele para operar e desenvolver-se satisfatoriamente. Segundo David Aschauer, ex-economista senior do FRB/EUA (*Federal Reserve Bank*), a qualidade e a extensão do sistema de transporte rodoviário têm impacto direto no crescimento econômico – boas estradas conduzem a bons negócios.

Segundo levantamento do Ministério dos Transportes, realizado em 2003 pelo Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), a malha rodoviária nacional tem 1.725.000 km sendo apenas 9,6% pavimentada (165.000 km). Conseqüentemente, o volume de estradas a ser pavimentado no Brasil é muito grande abrindo espaço para tecnologias que busquem a execução de pavimentos seguros, duráveis, com o menor impacto ambiental possível e com baixo custo de implantação e manutenção. Segundo dados de 2005 da Confederação Nacional do Transporte (CNT), 72% das estradas apresentavam-se em condições inadequadas, com conceito variando de péssimo a deficiente.

Para as malhas urbanas, sabe-se que existe nos municípios brasileiros, parcela significativa ainda em terra ou com revestimento primário, principalmente nas periferias ou em bairros mais pobres. A cidade de São Paulo, por exemplo, de acordo com dados do site da própria prefeitura de 30/11/2005, possui cerca de 3.000 km a serem pavimentados, ou seja, 18% da malha total de 16.400 km, sem considerar aproximadamente 1.500 km dos quais não se têm informação (PMSP, 2005).

Uma estrada em condições ruins ocasiona um aumento de 57% no consumo de combustível, 37% nos custos operacionais e 50% nos acidentes. Ainda segundo dados do CNT, as estradas brasileiras são responsáveis pela movimentação de 95% dos passageiros e 60% do transporte de cargas.

Existe uma carência muito grande de rodovias pavimentadas, principalmente as secundárias e vicinais, responsáveis por significativas parcelas do transporte de carga de produtos industrializados, do agro negócio e matérias primas, tanto no mercado interno como para a exportação e importação, contribuindo para o aumento do custo Brasil.

Convém lembrar que aproximadamente 98% da malha pavimentada brasileira é asfáltica e o petróleo é hoje uma das principais incógnitas no caminho do crescimento global. Segundo Campbell (2005), que atualmente dirige a Association for the Study of Peak Oil & Gás, a curva de produção na maioria das regiões, atingiu seu auge e o futuro aponta em uma direção para baixo. Ao mesmo tempo, os preços apontam para cima.

Destaque-se, ainda, a questão do aquecimento global, problema que vem se agravando acentuadamente com o passar dos anos aumentando o risco de catástrofes naturais. Sabe-se que entre as principais causas do aquecimento, estão a queima de combustíveis fósseis e a produção desenfreada de resíduos sólidos.

É importante observar que, do ponto de vista de mercado no Brasil, caso todo o RCD de origem mineral ($61,6 \times 10^6$ t/ano) seja empregado como agregados de construção civil, sem desconsiderar a contribuição do gesso e do vidro, a participação seria de 16,2%, pois o consumo de agregados no país é da ordem de 380×10^6 t/ano. O setor público de agregados que considera as atividades de pavimentação e obras públicas, pode consumir em torno de 84% na geração nacional da fração mineral do RCD (Angulo et al. 2005). Desta forma, os agregados reciclados de RCD são apenas uma fonte de matéria prima alternativa para o setor de produção de agregados naturais.

A grande vantagem competitiva dos agregados reciclados é a capacidade de minimizar as distâncias de transporte entre a produção e o consumidor final (custo do frete). Tendo a cidade de São Paulo como exemplo, esta distância

varia de 30 a 50 km para agregados naturais britados, responsável por 65% dos custos do produto.

Outra facilidade é o fato de que a grande maioria dos órgãos públicos, construtoras e empreiteiras conta com os equipamentos necessários para a execução do CCR, pois são os mesmos utilizados na pavimentação tradicional (asfáltica).

A possibilidade de utilização dos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição vem, portanto, reforçar a necessidade de reduzir custos de obras além de uma alternativa ambientalmente sustentável, que preserva recursos não-renováveis e possibilita a valorização de materiais nobres, destinando-os ao atendimento de demandas sociais urgentes.

1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo analisar em laboratório as propriedades mecânicas básicas do concreto compactado com rolo (CCR) utilizando-se agregado reciclado de construção e de demolição (RCD), comparando-as com o concreto compactado com rolo executado convencionalmente com agregado natural britado.

São estudadas algumas características dos agregados de RCD reciclados e a maneira como estes influenciam no comportamento mecânico do concreto compactado com rolo. Busca-se desta forma, uma verificação preliminar da viabilidade de uma tecnologia para pavimentação de boa qualidade, menor impacto ambiental e menor custo de execução e manutenção.

Para se atingir estes objetivos, foram consideradas os seguintes passos e restrições:

- Buscaram-se vários tipos de amostras de agregados reciclados procedentes de entulho de construção civil. Cada tipo de entulho, com origem conhecida (demolição de pavimento de concreto, estrutura de

posto de gasolina, demolição de alvenarias, argamassas de revestimento, etc.), foi britado e classificado;

- Escolha de três tipos de agregados reciclados baseados em estudos e medidas de densidade com apoio do equipamento “*sink and float*”;
- Preparação de corpos-de-prova para uma dosagem básica de um concreto compactado com rolo elaborado com agregados britados graníticos (mistura de referência) e busca posterior de dosagens para os concretos com 50% e 100% de RCD, que levassem a resultados semelhantes no que tange à resistência à tração na flexão, parâmetro básico para o projeto estrutural de pavimentos;
- Determinação de características mecânicas básicas (módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e à compressão) para todos os concretos estudados.
- Análise crítica dos resultados obtidos face aos consumos de cimento e à aplicabilidade dos materiais estudados como base compactada por vibração em pavimentos.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto de sete capítulos, divididos da seguinte forma:

- Capítulo 1: apresenta a introdução do trabalho onde são definidos os objetivos e a organização da pesquisa.
- Capítulo 2: apresenta os resíduos de construção e demolição (RCD) trazendo um pequeno histórico, sua utilização na pavimentação brasileira, como é o seu processamento e suas diversas etapas no Brasil, o procedimento adotado para a sua amostragem e a separação densitária dos agregados reciclados graúdos utilizados.

- Capítulo 3: apresentação de um breve histórico, a conceituação do CCR, suas vantagens em relação às tradicionais bases cimentadas, algumas aplicações de agregados reciclados de RCD em pavimentos de concreto, a caracterização dos componentes necessários para a sua dosagem, principais estudos com CCR realizados no Brasil e sobre a utilização de agregados reciclados no CCR.
- Capítulo 4: apresenta a metodologia e os materiais empregados na pesquisa para as dosagens dos CCR estudados, a utilização de corpos-de-prova com dimensões reduzidas, coleta de amostra representativa e cálculo da amostra mínima para os agregados reciclados por meio da teoria de Pierre Gy para tratamento de minérios, a classificação densitária dos agregados reciclados graúdos de RCD com o emprego do equipamento de concentração densitária denominado *Sink and Float*. Aborda-se, ainda, a preparação e a cura dos corpos-de-prova para a execução dos ensaios para verificação das principais propriedades mecânicas do CCR e as modificações granulométricas sofridas pelos agregados desde a coleta até após a compactação do CCR.
- Capítulo 5: define o consumo de cimento para o CCR de acordo com o tipo de agregado reciclado utilizado e a dosagem definitiva para a realização dos ensaios. Apresentação dos resultados de todos os ensaios realizados.
- Capítulo 6: analisa os resultados obtidos nos ensaios realizados para o CCR com agregados reciclados com varias densidades e com agregados naturais britados. Compara ainda os resultados obtidos com os de outros autores.
- Capítulo 7: apresenta a conclusão do trabalho, indicando a viabilidade do emprego do CCR com RCD na construção de bases para pavimentos além de sugestões para futuras pesquisas com CCR utilizando agregados reciclados de RCD.

2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DE DEMOLIÇÃO (RCD)

Resíduos de Construção e de Demolição (RCD) são considerados todos os resíduos oriundos das atividades de construção, sejam eles de novas construções, reformas, demolições que envolvam serviços de obras de arte e limpezas de terrenos com presença de solos ou vegetação (ANGULO, 2000; FERRAZ et al., 2001).

A Resolução CONAMA 307 (2002) define os RCD como materiais “provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., e são comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”.

A porção composta por concretos, argamassas, blocos, tijolos, telhas, solos e gesso dos RCD é de origem mineral. Esta é predominante no RCD, representando aproximadamente 90%, na relação, no Brasil (BRITO, 1998; CARNEIRO *et al.*, 2000), na Europa e em alguns países asiáticos (HUANG *et al.*, 2002).

O RCD tem, no mínimo, duas fontes de geração típicas: construção e demolição. Em diversos países os resíduos da construção representam de 19 a 52% do RCD, enquanto que os resíduos de demolição representam de 50 a 81% do RCD (ANGULO, 2000).

Em Hong Kong, na China, os dados apontaram para uma geração diária de 22.000 toneladas de resíduos de construção no ano de 1991, que incluíram 16.000 toneladas dispostas em aterros, em vias públicas e em canais de deposição marinha (POON, 1997).

Já nos Estados Unidos, calculou-se que, no ano de 1996, a produção de RCD chegou a aproximadamente 136 milhões de toneladas, perfazendo um total *per capita* de 1,27kg de material por dia, devendo-se ressaltar que não estavam incluídos neste montante os resíduos de pavimentos e pontes (PINTO, 1999).

O RCD representa de 13 a 67% em massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tanto no Brasil como no exterior e cerca de 2 a 3 vezes a massa do lixo urbano (JOHN, 2000).

No Brasil, a geração média de RCD para algumas cidades brasileiras foi estimada em 500 kg/hab.ano (PINTO, 1999). Na Europa, a média de geração é acima de 480 kg/hab.ano (SYMONDS, 1999 apud Angulo, 2005).

Segundo dados do IBGE de 2002, a população brasileira era de aproximadamente 170 milhões de pessoas, sendo que 137 milhões vivem no meio urbano. Com isso, teríamos um montante de resíduos, por estimativa, da ordem de $68,5 \times 10^6$ t/ano (ANGULO *et al.*, 2002), valor que representa em torno de 40% da geração de RCD (sem solos) dos países da União Européia. A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com mais de 17 milhões de pessoas, gera aproximadamente $5,5 \times 10^6$ t/ano de RCD (ANGULO *et al.*, 2002).

Devido a problemas de fiscalização, os RCD são responsáveis por deposições clandestinas tanto no Brasil como no exterior (PINTO, 1999). Os resíduos sólidos da construção civil dispostos irregularmente, geram impactos ambientais podendo trazer riscos à população como proliferação de doenças, assoreamento dos córregos e demais recursos hídricos e obstrução dos sistemas de drenagem com conseqüente aumento das enchentes nas estações chuvosas.

Além do elevado desperdício de tempo e materiais na construção civil e tendo como conseqüência o impacto nos custos finais dos empreendimentos, as áreas urbanas destinadas à deposição de resíduos estão se tornando cada vez

mais escassas. Este fato está fazendo com que muitos países mudem seus métodos organizacionais e produtivos na construção civil (ZORDAN, 1997).

Em vários países da Europa, a destinação dos resíduos de construção para aterros tem sido cada vez menos tolerada. Como forma de inibi-la e de incentivar a reciclagem, novas leis vêm sendo adotadas e uma política de taxao de aterros vem sendo desenvolvida.

Alm da poltica de taxao de aterros, alguns pases como Inglaterra, Holanda e Finlndia passaram tambm a taxar as matrias-primas oriundas de atividade de minerao como forma de fomentar o uso de agregados reciclados. Na Inglaterra, por exemplo, so taxados areia, cascalho e pedras (SCHNEIDER, 2003).

Convm lembrar ainda que os RCD podem variar de acordo com as caractersticas da regio em que foram gerados. A madeira se faz muito presente nas construes do Japo e dos Estados Unidos enquanto que no Brasil existe uma presena maior de uma mistura composta de cermica ou blocos de concreto, argamassa, concreto armado, ao, plstico, amianto e madeira. Estas caractersticas devem ser consideradas de acordo com a utilizao desejada para os RCD.

2.1 Breve Histrico

A construo civil uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e desde os primrdios da humanidade foi executada de forma a gerar como subproduto grande quantidade de entulho mineral. Tal fato despertou ateno dos construtores j na poca da edificao das cidades do Imprio Romano. desta poca que datam os primeiros registros de reutilizao de rsduos minerais da construo civil na produo de novas obras (LEVY, 1997)

Por volta de 1860, na Alemanha, foram utilizadas sobras de blocos de concreto de cimento Portland na produo de artefatos de concreto (LEVY, 2001). Apesar disso, s a partir de 1928, comearam a ser desenvolvidas pesquisas

de forma sistemática, para avaliar o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados oriundos de alvenaria britada e do concreto. Entretanto, foram as grandes catástrofes deste século, como terremotos e guerras que impulsionaram a prática do uso de material reciclado (LIMA, 1999).

A primeira grande aplicação de entulho reciclado, só foi registrada após o final da 2ª Guerra Mundial, na reconstrução das cidades Européias, que tiveram suas edificações totalmente demolidas. O escombros ou entulho resultante foi britado para produção de agregados visando atender à demanda na época e minimizar o custo decorrente das operações de remoção e limpeza. A opção das autoridades locais por reciclar todos estes materiais foi evidente. Nesta época, o governo alemão decretou ser prioridade a reconstrução da infraestrutura de transportes e o país se tornou pioneiro na reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de materiais para a pavimentação (LUND, 1993). Em 1960, todo o entulho estimado entre 400 e 600 milhões de metros cúbicos havia sido reciclado.

Porém, como a reciclagem na construção civil ainda não é uma idéia amplamente difundida, mesmo na Europa há um desperdício de equivalente a 200 milhões de toneladas anuais entre concreto, pedras e recursos minerais. Este volume seria suficiente para construir uma rodovia com seis faixas de rolamento interligando as cidades de Roma e Londres (LEVY, 2001)

No Brasil, a reciclagem de RCD teve início na década de 80 através do uso de “maseiras-moinho”, equipamentos de pequeno porte, para uso exclusivo em obras de edificações. Esse equipamento propicia a moagem intensa de resíduos menos resistentes, principalmente os de alvenaria e argamassas, possibilitando sua reutilização em serviços de revestimento da própria edificação em construção (PINTO, 1999).

A primeira usina recicladora do Brasil foi implantada pela Prefeitura do Município de São Paulo em 1991, em Itatinga, na zona sul, com a finalidade de produzir agregados reciclados para sub-base de pavimentos. Depois de alguns

anos, este equipamento foi transferido para a zona leste de São Paulo, no bairro de Itaquera (ZORDAN, 1997).

Em 2002, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA publica a resolução 307 que estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

A publicação das primeiras normas nacionais relacionadas aos agregados reciclados de resíduos de construção só ocorreu em 2004, quando a ABNT lançou 4 especificações que tratam desde a instalação de recebimento do material até a sua aplicação na pavimentação ou em concreto sem função estrutural. As normas são as seguintes:

- NBR 15113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

No Brasil, a composição característica do RCD é de cerâmica ou blocos de concreto, argamassa, aço, concreto armado, plástico, amianto e madeira. Os produtos oriundos do gesso têm aumentado sua participação na composição e tende a representar uma parte significativa no futuro.

A maioria das nações mais desenvolvidas como Japão, Dinamarca, Holanda e Bélgica entre outras, já perceberam a necessidade de reciclar as sobras da construção civil pesquisando o assunto visando um determinado grau de

padronização dos procedimentos adotados para obtenção de agregados, atendendo aos limites que permitem atingir um padrão mínimo de qualidade.

2.2 Pavimentação no Brasil com Utilização de Agregados Reciclados

Em 1984 foi pavimentada a primeira via de São Paulo empregando agregados reciclados de RCD, com acompanhamento tecnológico por meio de parceria entre a PMSP (Prefeitura Municipal de São Paulo) e o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) na execução e no acompanhamento da obra, respectivamente. Este logradouro, de nome Gervásio da Costa, localiza-se na zona oeste da cidade e é caracterizado por um baixo volume de tráfego. A utilização do agregado reciclado foi na camada de reforço do subleito e na sub-base. Seu desempenho foi considerado altamente satisfatório na época (BODI *et al.*, 1995).

Bodi *et al.* (1995) citam que esta utilização teve como origem a iniciativa da própria população de São Paulo, que em muitas vias urbanas utilizou resíduos de construção como revestimento primário, a fim de melhorar as condições de tráfego, principalmente em períodos de chuva.

Em 2004 utilizou-se agregado reciclado na execução de reforço do subleito e sub-base na pavimentação das vias do Campus da USP zona leste.

Em Belo Horizonte (MG), os agregados reciclados vêm sendo utilizados desde 1996, na execução de revestimento primário, reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos. De 1996 até julho de 2001 foram utilizadas 136.940 toneladas de material em 271 vias implantadas ou reconstruídas, em um total de 400 km de ruas, aproximadamente (DIAS, 2004)

Em março de 2002, a PMSP publicou no Diário Oficial do Município a sua especificação com o título de “Camadas de reforço do subleito, sub-base e

base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil”.

Como já citado, no ano de 2004 a ABNT publicou a norma para aplicação de agregados reciclados em pavimentação e em concreto sem função estrutural, a NBR 15116, que trata desses procedimentos normativos.

Atualmente, consta na tabela de preços unitários da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP), referente aos serviços de pavimentação, um capítulo específico (de número 14) relativo aos serviços com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Na Tabela 2.1 apresentam-se alguns preços de serviços utilizando agregados reciclados tendo como referência o mês de janeiro de 2007. Foi acrescentada uma coluna à direita tendo os preços o mesmo mês de referência, para os mesmos serviços utilizando-se agregados naturais britados, praticados pela PMSP. Na Tabela 2.2 apresentam-se algumas composições de preços da PMSP, de serviços executados com os dois tipos de agregados.

Tabela 2.1: Preços da tabela da PMSP – jan/2007

Descrição dos serviços	Unid.	Preço unit. (R\$) com agregado	
		RECICLADO	NATURAL
FUNDAÇÃO DE RACHÕES	m³	46,48	59,19
REVESTIMENTO PRIMÁRIO COM BRITA MISTURADA AO SOLO LOCAL INCLUSIVE ESCARIFICAÇÃO, VERIFICAÇÃO, UMEDECIMENTO, COMPACTAÇÃO E ENSAIOS; CAMADA ACABADA	m³	32,86	37,51
BASE DE BRITA (bica corrida)	m³	38,99	53,20
REFORÇO DO SUBLEITO/SUB-BASE DE SOLO MELHORADO COM BRITA 10% EM VOLUME	m³	11,23	12,56
REFORÇO DO SUBLEITO/SUB-BASE DE SOLO MELHORADO COM BRITA 20% EM VOLUME	m³	13,58	16,11
REFORÇO DO SUBLEITO/SUB-BASE DE SOLO MELHORADO COM BRITA 30% EM VOLUME	m³	15,92	19,66
REFORÇO DO SUBLEITO/SUB-BASE DE SOLO MELHORADO COM BRITA 40% EM VOLUME	m³	18,26	23,21
REFORÇO DO SUBLEITO/SUB-BASE DE SOLO MELHORADO COM BRITA 50% EM VOLUME	m³	20,61	26,76
REFORÇO DO SUBLEITO/SUB-BASE DE SOLO MELHORADO COM BRITA 60% EM VOLUME	m³	22,95	30,32
LASTRO DE BRITA	m³	44,89	61,71
DRENO DE BRITA	m³	40,68	54,08

Observa-se que o custo de equipamentos e mão de obra para a execução de um determinado serviço é o mesmo e a variação de preço é devido unicamente ao tipo de agregado utilizado. Os preços dos serviços onde se utilizam agregados naturais são maiores devido ao custo de britagem e principalmente às distâncias cada vez maiores entre as pedreiras e as obras localizadas nos centros urbanos, encarecendo o frete. Pode-se observar na Tabela 2.2 que o custo do agregado natural britado é 50% maior que o agregado reciclado, representando aumento no preço dos serviços de 24% até 37%. Pode-se observar ainda que o agregado é o insumo com maior custo nas composições de preço apresentadas. Uma redução de custo neste item pode significar em redução no custo total de um empreendimento qualquer.

Tabela 2.2: Composição de preços da tabela da PMSP – jan/2007

Base de bica corrida (m³)		Agregado reciclado			Agregado natural britado		
		Preço	Coefficiente	Total	Preço	Coefficiente	Total
Rolo compactador vibratório 7 t	h	53,92	0,052000	2,80	53,92	0,052000	2,80
Motoniveladora - 125 HP	h	99,24	0,052000	5,16	99,24	0,052000	5,16
Agregado	m³	23,44	1,200000	28,13	35,34	1,200000	42,41
Servente	h	6,28	0,152400	0,96	6,28	0,140400	0,88
Caminhão irrigadeira 6000l	h	53,46	0,036400	1,95	53,46	0,036400	1,95
Preço Total				38,99			53,20
Reforço de subleito melhorado com brita 30% em volume (m³)		Agregado reciclado			Agregado natural britado		
		Preço	Coefficiente	Total	Preço	Coefficiente	Total
Caminhão irrigadeira 6000l	h	53,46	0,009000	0,48	53,46	0,009000	0,48
Servente	h	6,28	0,020000	0,13	6,28	0,020000	0,13
Trator de tração agrícola	h	43,43	0,020000	0,87	43,43	0,020000	0,87
Grade aradora de 18 discos	h	1,69	0,020000	0,03	1,69	0,020000	0,03
Rolo compactador pé de carneiro	h	55,52	0,020000	1,11	55,52	0,020000	1,11
Motoniveladora - 125 HP	h	99,24	0,030000	2,98	99,24	0,030000	2,98
Rolo compactador vibratório 7 t	h	53,92	0,011000	0,59	53,92	0,011000	0,59
Agregado	m³	23,44	0,310000	7,27	35,51	0,310000	11,01
Rolo compactador de pneus -27 t	h	80,81	0,030500	2,46	80,81	0,030500	2,46
Preço Total				15,92			19,66
Lastro de brita (m³)		Agregado reciclado			Agregado natural britado		
		Preço	Coefficiente	Total	Preço	Coefficiente	Total
Agregado	m³	23,44	1,620000	37,97	34,61	1,200000	41,53
Servente	h	6,28	1,000000	6,28	6,28	1,000000	6,28
Retroescavadeira	h	53,88	0,012000	0,65	53,88	0,012000	0,65
Pó de pedra	m³				35,83	0,370000	13,25
Preço Total				44,89			61,71
Fundação de Rachão (m³)		Agregado reciclado			Agregado natural britado		
		Preço	Coefficiente	Total	Preço	Coefficiente	Total
Rachão D= 10 A 15 CM	m³	23,44	1,300000	30,47	34,54	1,250000	43,18
Trator de esteira - 9 TON.	h	75,70	0,027800	2,09	75,70	0,027800	2,09
Pá carregadeira de pneus-1,80 m³	h	85,28	0,015900	1,35	85,28	0,015900	1,35
Servente	h	6,28	2,000000	12,57	6,28	2,000000	12,57
				46,48			59,19

2.3 Processamento do agregado reciclado de RCD no Brasil

A reciclagem de RCD tem como base, as tecnologias aplicadas no tratamento de minérios. O tratamento de minérios é uma seqüência de operações unitárias. O principal objetivo é, a partir de um minério, produzir um concentrado com qualidade física e química adequada à sua utilização pela indústria de transformação (ANGULO, 2005). Nesse tratamento, não existe qualquer alteração da estrutura interna do mineral tais como reações químicas, metalúrgicas ou cerâmicas.

Estas operações unitárias para o tratamento de minérios são: redução de tamanho, separação de tamanho, concentração e operações auxiliares. As principais operações unitárias empregadas na reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição são as que se seguem:

2.3.1 Cominuição

Cominuição são operações destinadas a reduzir a dimensão das partículas (fragmentação) para o transporte, para o uso final e/ou para as operações unitárias subseqüentes. Estas operações podem ser de dois tipos (LUZ, 2004): britagem ou moagem, dependendo da granulometria do material. A britagem é normalmente empregada na reciclagem da fração mineral dos RCD. Ela reduz as partículas por meio de ação mecânica externa como força de compressão (britagem por mandíbula) ou impacto (britagem por impacto) (ANGULO, 2005).

2.3.2 Separação por granulometria

Essa operação tem o objetivo de separar as partículas pelo seu tamanho através de peneiras ou classificadores. O peneiramento geralmente é realizado a seco, apresentando em parte da fração graúda, uma fração fina aderida a ela.

2.3.3 Concentração

Estas operações de concentração são empregadas quando existem várias espécies minerais presentes e têm por objetivo aumentar o teor de mineral útil, removendo outros minerais (sub-produtos) ou contaminantes. Estas operações variam de importância de acordo com a origem do RCD e podem ser realizadas baseadas na cor, densidade, forma, propriedades magnéticas etc.

É um processo onde as partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas umas das outras por ação da força de gravidade ou por forças centrífugas. É uma das mais antigas formas de processamento mineral (LUZ, 2004).

É comum no Brasil a classificação visual do RCD evitando o recebimento na usina de cargas com altos teores de fração não mineral como madeira, vidros, betume, plásticos, gesso, etc

Após a classificação visual utiliza-se comumente a catação que separa manualmente diferentes fases, escolhidas através de diferenças de cor, forma ou textura das partículas. Essa operação pode ser realizada antes ou após a cominuição, sobre as correias transportadoras com o objetivo de se retirar a fração não-mineral grosseira remanescente no RCD mineral.

Conforme mostra a Figura 2.1, a separação dos materiais ferrosos da fração mineral do RCD é realizada através de processos magnéticos após a etapa de cominuição.

Figura 2.1: Separação magnética dos materiais ferrosos

Os agregados reciclados são estocados em pilhas de acordo com a sua granulometria (Figura 2.2), de onde serão transportados para o seu destino final através de caminhões basculantes.

Figura 2.2: Agregados estocados em pilhas de acordo com a sua granulometria

2.4 Procedimento de Amostragem de Agregados Reciclados

O procedimento de amostragem consiste na retirada de quantidades pré-definidas (incrementos) de material de um lote que se deseja amostrar. Esta amostra é submetida a uma série de etapas de preparações que podem envolver operações de redução de granulometria, homogeneização e quarteamento, até a obtenção da amostra final, com massa e granulometria definidas para realização de testes, análises química e instrumental (GÓES, 1991).

Um procedimento de amostragem é importante para a avaliação de depósitos minerais, o controle de processos laboratoriais e industriais e a comercialização de produtos. Uma amostragem não representativa ou mal conduzida pode levar a distorções nos resultados e prejuízos financeiros.

Das teorias desenvolvidas para a determinação da massa mínima da amostra para uma dada granulometria e um dado erro, várias mais simples fazem uma estimativa pessimista e implicam em amostras desnecessariamente grandes sendo que outras requerem uma sofisticação com grande quantidade de informações nem sempre possíveis de se obter. A teoria adotada neste trabalho foi desenvolvida por Pierre Gy e se destaca pela sua utilidade prática. A teoria pressupõe que o material a ser amostrado esteja homogeneizado e que não existam erros inerentes às ferramentas de amostragem ou máquinas de cominuição (GOES, 1991).

A amostragem sistemática adotada no trabalho é aquela onde os incrementos são coletados a intervalos regulares de tempo, calculados a priori. Os procedimentos comentados abaixo, foram utilizados para os cinco lotes de agregados reciclados estudados.

A equação da amostragem é dada por:

$$S_a^2 = d^3 \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{W} \right) \cdot l \cdot f \cdot h \quad [2.1]$$

onde:

S_a = erro total de amostragem expresso como desvio padrão;

d = diâmetro máximo das partículas no material a ser amostrado, aproximado pela abertura da peneira, em cm, que retém 5% do material;

Q = fator de composição mineralógica em g/cm³;

w = massa mínima da amostra em gramas;

W = massa do material a amostrar em gramas;

l = Fator de liberação do material;

f = Fator de forma das partículas;

h = fator de distribuição de tamanho das partículas.

Para valores significativos de W , podemos considerar a parcela $1/W$ nula com a equação [2.1] resultando em :

$$w = \frac{d^3 \cdot Q \cdot l \cdot f \cdot h}{S_a^2} \quad [2.2]$$

O fator de composição mineralógica (Q) é dado pela equação:

$$Q = x \cdot (100 - x) \cdot \left[\frac{x}{100} \cdot \rho_a + \frac{(100 - x)}{100} \cdot \rho_b \right] \cdot \rho \quad [2.3]$$

onde:

x = teor do mineral de interesse na amostra, em porcentagem;

ρ_a = peso específico do mineral de interesse em g/cm³;

ρ_b = peso específico da ganga em g/cm³;

ρ = média ponderada dos pesos específicos de todas as partículas.

À medida que se processa a liberação do minério por cominuição, o material torna-se cada vez mais heterogêneo devido à grande diferença entre as partículas que o compõem. Quando as partículas possuírem os mesmos constituintes minerais e forem homogêneas, $l = 0$. Se o diâmetro máximo das

partículas em centímetros (chamado de d) for menor ou igual ao diâmetro máximo das partículas que assegure uma completa liberação do mineral de interesse, também em centímetros (chamado de d_0), $I = 1$. Caso contrário,

$$I = \sqrt{\frac{d_0}{d}}.$$

As partículas possuem formas irregulares e podem tender mais a esféricas do que cúbicas durante a cominuição. Geralmente, o fator de forma (f) das partículas para os minérios britados tem valor 0,5.

Recomenda-se o fator de distribuição do tamanho das partículas $h = 0,25$ para minérios que tenham sido cominuídos para passar numa dada abertura de peneira e $h = 0,5$ quando os finos tenham sido removidos utilizando-se a próxima peneira da série.

2.5 Separação densitária dos agregados reciclados graúdos de RCD

Como já comentado, as usinas de reciclagem classificam os agregados reciclados e o RCD pela cor da seguinte forma: cinza (visualmente observa-se a predominância de componentes de natureza cimentícia) e o vermelho (visualmente observa-se a predominância de componentes de natureza cerâmica).

Sabe-se que o emprego dos agregados reciclados de RCD em concretos é viável. Um dos aspectos que limitam o seu uso refere-se à heterogeneidade da composição e à variabilidade das propriedades físicas (CARRIJO, 2005).

Os agregados reciclados graúdos de RCD são mais porosos que os agregados naturais de rochas calcárias e ígneas. Esta porosidade reduz a resistência mecânica dos concretos. Por outro lado, as propriedades físicas, a absorção de água e a massa específica aparente das fases (concreto, argamassa, cerâmica e rocha) do agregado reciclado graúdo de RCD, que estão relacionadas com a porosidade, são muito variáveis. A separação por fases por meio da catação

não é eficiente para controlar o comportamento dos concretos produzidos (ANGULO, 2005).

Apesar das especificações e normas existentes indicarem valores limites e propriedades de controle destes agregados para o uso em concreto, elas dependem muito da quantificação de fases por classificação visual do material, técnica que não garante a homogeneidade do produto final (uma vez que qualquer dessas fases pode ser mais ou menos porosa, por exemplo). Mais do que isso, os resultados dessa classificação não apresentam uma relação clara com o desempenho dos concretos.

O desenvolvimento tecnológico dos materiais de construção tem sido grande nos últimos anos. Os concretos coloridos através de pigmentos, as telhas de concreto e outros produtos novos tendem a dificultar uma classificação visual dos agregados reciclados de RCD levando-se em conta somente a sua cor preponderante.

São necessárias informações detalhadas sobre as características mais relevantes dos agregados reciclados de RCD que controlam o comportamento mecânico dos concretos. Isso é condição para aumentar o emprego desses agregados na produção de produtos à base de cimento (CARRIJO, 2005). A porosidade desses agregados, bem como a influência da densidade na distribuição das fases e na composição química e mineralógica foi correlacionada com o desempenho dos concretos, por Angulo (2005).

Cada RCD possui uma procedência, história e produção diferente (CARRIJO, 2005). O controle da variabilidade dos agregados reciclados de RCD permite um comportamento mais homogêneo dos materiais. A separação em meio denso é interessante, conforme demonstrado por Angulo (2005), por separar os agregados de RCD reciclados em função da massa específica aparente das partículas que o constituem.

Segundo Luz (2004), a separação em meio denso é um processo de separação gravítica aplicado na separação de minerais, onde o meio denso pode ser constituído de suspensões estáveis de densidade pré-determinada.

As espécies minerais são separadas num meio denso conhecido onde os minerais com densidade inferior flutuam e os minerais com densidade superior, afundam. O processo de separação em meio denso é mais aplicado para partículas graúdas, acima de 0,6 mm.

O equipamento para essa separação é o cone de separação densitária *Sink and Float* que é constituído de dois compartimentos cilíndrico-cônicos ligados por uma calha. Estes dois compartimentos possuem peneiras no fundo de seus reservatórios, que permitem a circulação do meio denso, no sentido do maior para o menor.

Os ensaios foram realizados em bateladas, sendo a alimentação feita através do compartimento maior. O material mais denso afunda e fica retido na peneira deste compartimento. O material menos denso flutua e é transportado através da calha para o compartimento menor onde ficou retido na sua peneira ocorrendo assim a separação (LUZ, 2004).

3 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR)

3.1 Conceituação

O concreto compactado com rolo (CCR) é um material utilizado principalmente na construção de barragens e pavimentos. É um concreto seco, consolidado por compactação, sendo esta executada geralmente por rolos compressores vibratórios, usualmente empregados na compactação de materiais granulares (RIBEIRO *et. al*, 2000).

O CCR é um concreto de consistência dura, seca e de trabalhabilidade particular, de maneira a permitir seu adensamento com rolos compressores lisos, estáticos ou vibratórios. Eventualmente, quando o CCR for aplicado em revestimento, é recomendada a associação de rolos de pneus e rolos lisos para melhorar o acabamento da superfície de rolamento. Apresenta consumo de cimento menor que os convencionais normalmente empregados em pavimentação (PITTA *et al*, 1995).

O consumo de cimento neste tipo de concreto pode variar de 40 kg/m³ a 380 kg/m³, em função do tipo das exigências de desempenho específicas de cada aplicação deste material. Com baixos consumos de cimento, o CCR apresenta uma aparência semelhante à da brita graduada tratada com cimento (BGTC). Já com maiores consumos e preparado com uma curva granulométrica adequada, sua aparência tende a de um concreto convencional (BALBO, 2005).

Dentre os campos de aplicação do concreto compactado com rolo, uma das que mais se destaca é a de base de pavimentos de concreto, seguida do emprego como base de pavimentos asfálticos e, mais recentemente, como camada de revestimento. Pode ser utilizado ainda como base de pavimentos com peças pré-moldadas de concreto (pavimentos intertravados).

Quando utilizado como base, tem como principais funções uniformizar o suporte da fundação, evitar o efeito danoso do bombeamento de finos plásticos, sendo sua principal função aquela de absorver tensões de tração na flexão oriundas da aplicação das cargas pelos veículos.

Ainda como base, tem como principais características ser mais resistente às erosões, reduzir as deformações verticais nos pavimentos (deflexões) e aumentar a eficiência de transferência de carga em juntas do pavimento de concreto. O CCR apresenta também em relação ao pavimento de concreto convencional, menor custo em função do menor consumo de cimento.

Os materiais constituintes do concreto são encontrados com certa facilidade em grande parte do território nacional. O Brasil é um dos maiores produtores de cimento do mundo, tendo produzido trinta e seis milhões e setecentas mil toneladas no ano de 2005, (SNIC, 2006), o que propicia o emprego desse insumo como material básico de pavimentação.

Os equipamentos utilizados na execução do CCR são os mesmos da pavimentação tradicional em concreto asfáltico, ou seja, vibroacabadora asfáltica ou motoniveladora e rolos compactadores vibratórios lisos ou de pneus. Convém lembrar a grande disponibilidade destes equipamentos no Brasil, pois 98% da malha rodoviária nacional foi executada com pavimentos asfálticos (BALBO, 2007). O transporte do CCR pode ser por meio de caminhões-betoneira ou basculantes tendo em vista a sua consistência seca.

Em cada campo de aplicação, o CCR tem suas particularidades em termos de resistência mecânica, consumo de cimento, dosagem, execução e controle tecnológico. Este trabalho pretende estudar o CCR como base de pavimentos sendo incorporado em sua fabricação os agregados reciclados de construção e de demolição.

3.2 Histórico

“O estudo da pavimentação de uma maneira geral se confunde com a evolução humana, pois desde os princípios da humanidade o homem teve a necessidade de se locomover de um lugar para outro e para isso foi necessário abrir caminho para transpor os mais variados obstáculos” (ABREU, 2002).

A estabilização de materiais com ligantes hidráulicos como técnica construtiva vem da época do Império Romano. Devido à necessidade de construir vias para tráfego intenso e reduzida necessidade de manutenção, as grandes vias consulares na época áurea de Roma foram executadas com técnicas de estabilização utilizando-se adições de pozolanas e cal (BALBO 1993).

A idéia de se utilizar o concreto na construção de pavimentos não é recente. A primeira aplicação de CCR que se tem notícia foi realizada na Escócia em 1865 (JOFRE, 1989).

Entretanto, por iniciativa de George Bartholomew, em 1894, foi construído o primeiro pavimento contendo uma camada de CCR, em que o material compunha a parte inferior de um pavimento de concreto simples e mantida a aderência total entre ambas as camadas, tendo sido a compactação do CCR conseguida exclusivamente por compressão. Esta iniciativa ocorreu na East Court Avenue, em Bellefontaine, Ohio, EUA. (DNER, 1992). Em 1910, em Grand Forks, Dakota do Norte, o CCR foi empregado na pavimentação urbana e em 1935, na Bélgica, em estrada rural.

Modernamente, a experiência em escala com o material nesse tipo de aplicação é oriunda da Grã-Bretanha, iniciada por volta de 1944 e cristalizada nos experimentos de Crawley, Surrey, Leischester, North Wallis e Bracknell, sendo dignas de nota particular as estradas de Crawley (70 km) e a Londres-Birmingham (100 km) (DNER, 1992).

Na década de 50, na França, a adição de cimento a materiais granulares naturais passou a ser visto como uma forma de acrescentar finos na mistura sendo chamados de “*graves maigres*” (BALBO, 1993).

Na Espanha, as primeiras aplicações de CCR datam de 1970 e começaram em pavimentos viários de tráfego leve e de caminhos rurais. A partir de 1984, as aplicações ocorreram em rodovias principais e auto-estradas. Em 1990, mais de 4.000.000 m² de pavimentos de CCR haviam sido executados. Em auto-estradas, o CCR tem um revestimento asfáltico com cerca de 3 a 5 cm de espessura (DNER, 1992).

No Japão, teve início a execução de CCR em 1987 sendo que em 1992 cerca de 240.000 m² de área havia sido executada. Cabe lembrar a experiência Australiana, Sueca, Canadense, Alemã, Chilena e Argentina (PITTA, *et al*, 1995).

Existem alguns registros históricos da utilização do CCR no Brasil no ano de 1946 na pavimentação do Vale do Anhangabaú. Em 1950 houve a pavimentação do aeroporto paulista de Congonhas e alguns pavimentos no Rio de Janeiro no ano de 1954 (ANDRIOLO, 1998).

No Brasil, as primeiras obras que utilizaram o CCR como bases de pavimento asfáltico datam de 1972 na cidade de Porto Alegre. Atualmente existem cerca de 2.000.000 m² de bases de CCR como base de pavimento asfáltico na sua maioria e como base de pavimento de concreto.

Há registro de utilização de CCR como base de pavimento de concreto simples em Santa Catarina, revestimento de ruas em Salvador, Pelotas e São Paulo (PITTA *et al.*, 1995). Mais precisamente em 1989 foram pavimentadas ruas urbanas nos Bairros de Santana e São Mateus pela Prefeitura Municipal de São Paulo (ANDRIOLO, 1998). Foi realizado no ano de 1991, pavimentação urbana utilizando o CCR como base e revestimento nas cidades de Itajaí e Criciúma, no Estado de Santa Catarina (TRICHÊS, 1993).

Nos últimos anos, algumas rodovias brasileiras pavimentadas com concreto simples, utilizaram base de CCR. Além das Marginais da Rodovia Castello Branco - SP (2002), Rodovia dos Imigrantes – SP (2002), SP 79 (2001), BR 232 - PE (2003), cabe destacar o Rodoanel Mário Covas em seu trecho oeste, em São Paulo. São duas pistas com 32 km de extensão, 4 faixas de rolamento com 3,60 m, acostamento com 3,0 m e refúgio com 1,0 m. Está em andamento o trecho sul com aproximadamente 53 km onde a maior parte do projeto prevê a utilização do CCR como base de pavimentos.

Diversos corredores de ônibus no Brasil têm utilizado esta tecnologia, com destaque para os corredores das cidades de Curitiba, Porto Alegre e São Paulo. Nos últimos anos, os pontos de parada e os Terminais de ônibus integrantes do projeto Passa Rápido da Prefeitura Municipal de São Paulo foram executados com CCR como base de pavimento de concreto simples.

3.3 As vantagens do CCR em vista das tradicionais bases cimentadas

Até o final da década de 1960, o material mais utilizado para base de pavimentos no Estado de São Paulo era o solo-cimento. A partir desta data, com a construção da Rodovia Castello Branco, diversos trechos foram executados utilizando como base, a brita graduada tratada com cimento (BGTC), depois sendo largamente utilizada na década de 1980. Com o passar dos anos, as rodovias que utilizaram estes tipos de bases, apresentaram patologias no revestimento asfáltico tais como fissuras em bloco, de difícil solução no que diz respeito à sua restauração.

Estes dois tipos de bases cimentadas apresentam comportamentos diferentes quanto ao desempenho. No solo-cimento, a hidratação do cimento forma uma pasta envolvendo as partículas de solo de forma a criar uma matriz que fixa as partículas não aderidas. Esta hidratação causa a formação de um esqueleto de cristais de silicatos hidratados de cálcio, responsáveis pelo incremento de resistência ao cisalhamento (BALBO, 1993).

No caso da BGTC, esta pasta de cimento não é suficiente para envolver totalmente os agregados. Os cristais desenvolvidos durante o processo de hidratação, originam ligações pontuais entre os grãos dos agregados. Esta estabilização dos agregados devido à ação do cimento apresenta determinadas quantidades de vazios (poros). A melhoria da resistência da BGTC está intimamente ligada a uma dosagem que apresente uma composição granulométrica desuniforme, com a menor quantidade de vazios possíveis e uma maior quantidade de pontos de contato entre grãos e pasta de cimento, após a sua compactação e cura (LILLEY & WILLIANS, 1973). A resistência da BGTC depende, além da resistência dos grãos, das ligações ocasionadas pela pasta de cimento causando uma coesão aparente no material (BALBO, 1993).

Para os dois tipos de bases, as principais limitações tecnológicas estão ligadas à pequena quantidade de argamassa existente na mistura acarretando problemas de heterogeneidade nos materiais. Existem limitações técnicas e de custo quanto ao aumento de consumo de cimento para estas bases, tornando-as inviáveis. A heterogeneidade do material implica em porosidade heterogênea e também influencia negativamente na fadiga do material em serviço (BALBO, 1996).

Segundo Balbo (2005), *“o processo de fadiga, associado à formação de fratura progressiva na estrutura interna da matéria, é resultado da nucleação de microfissuras, a abertura e propagação das mesmas. A grande quantidade de poros não preenchidos por argamassa age de modo desfavorável, resultando em evolução das fissuras de forma mais rápida que em um concreto, resultando em fendilhamentos em forma de blocos”*. Estes blocos apresentam movimentos entre si que sob a ação de cargas, afetam o revestimento asfáltico. Este processo de degradação por fadiga na base cimentada, na maioria dos casos, exige algumas ações de manutenção que implicam em demolição e remoção do revestimento e da base comprometida.

Estes dois tipos de bases cimentadas, solo-cimento e BGTC, apresentam, do ponto de vista mecânico para elevado número de repetições de carga, elevado módulo de elasticidade, porém sem um ganho significativo de sua resistência à

tração na flexão. Estas bases muito rígidas têm como característica a responsabilidade da tarefa de resistir aos esforços de flexão deixando a camada de revestimento trabalhando em compressão. Apesar das vantagens iniciais, estas bases possuem pequena resistência à tração na flexão que somada ao problema da heterogeneidade da mistura, são os motivos de rompimentos precoces destas camadas cimentadas.

De acordo com o exposto, as principais qualidades do CCR são (BALBO, 2005):

- Elevada rigidez contribuindo decisivamente para se evitar o surgimento de deformações em trilhas de roda nas misturas asfálticas de revestimento;
- Bases mais homogêneas, elevada resistência e menores riscos de retração hidráulica dada à exigência de cura do material;
- Não está sujeito a processos de contaminação e/ou erosão;
- Oferece melhores condições de atendimento do grau de compactação desejado para o revestimento asfáltico;
- Resistência à fadiga indiscutivelmente superior que bases estabilizadas com cimento (BALBO,2005);
- Não apresentam suscetibilidade estrutural de materiais estabilizados apoiados sobre suporte muito resiliente, como é o caso da BGTC;
- Viabilização do conceito de construção por etapas uma vez que a base poderá ser projetada para uma durabilidade muito maior que o próprio revestimento, que poderá receber reforços à medida da necessidade;

O CCR permite arranjos granulométricos na sua dosagem que resultam em concretos adensados por compactação enérgica, com elevadíssima resistência à tração na flexão e consumos de cimento relativamente baixos. Estes fatores trabalham conjuntamente contribuindo para a redução de processos de retração hidráulica no concreto, conseqüentemente diminuindo a incidência de fissuras de retração e sua abertura. Isto não elimina a necessidade de cura do CCR, devendo ser protegidas todas as faces da camada.

Ao contrário do volume crescente dos RCD, as jazidas de agregados naturais utilizadas no concreto estão se tornando cada vez mais escassas. As distâncias entre as jazidas e os locais de consumo se tornam cada vez maiores, aumentando os custos de produção, transporte e comercialização, refletindo diretamente no custo das obras (CARRIJO, 2005). Neste contexto julgou-se possivelmente vantajoso o emprego de RCD para a execução do CCR.

As fontes de geração de RCD são as mais variadas possíveis, cabendo destacar a falta de qualidade dos materiais e mão-de-obra no setor da construção civil. Materiais fora das exigências das normas, mão de obra desqualificada e a falta de uma fiscalização mais eficaz, dão origem a perdas significativas de materiais que saem da obra como entulho. O volume de água, energia e matérias primas utilizadas pela construção civil correspondem a mais de um terço do total consumido anualmente por toda a sociedade (JOHN, 2000).

No Brasil, a geração de RCD por habitante-ano é de cerca de 500 kg, mediana para algumas cidades brasileiras (PINTO, 1999). Parte considerável do RCD é depositada em locais ilegais. Esta deposição irregular na malha urbana causa na maioria das vezes, problemas de assoreamento dos cursos d'água, poluição dos aquíferos, degradação de áreas urbanas, entupimento de galerias e bueiros, proliferação de animais e insetos causando doenças e afetando a saúde pública. Como exemplo, mais de 20% do RCD gerado na cidade de São Paulo, é depositado ilegalmente gerando um custo de R\$ 45 x 10⁶ para a sua coleta, transporte e deposição em aterros (SCHNEIDER, 2003).

A reciclagem é a alternativa para reduzir o impacto ambiental devido o consumo de matéria prima natural e a geração desordenada de resíduos. A reciclagem de RCD minimizará os problemas de gerenciamento dos resíduos sólidos das autoridades municipais. Como consequência, haverá um crescimento da vida útil dos aterros, diminuição dos pontos de descarte clandestinos e redução dos custos de gerenciamento de resíduos, além de um melhor bem estar social e ambiental (LEITE, 2001).

Os agregados naturais estão entre os bens minerais mais consumidos, sendo 90% da produção brasileira de agregados destinada à construção civil dos quais 220 milhões de toneladas/ano são destinados à produção de concretos e argamassas.

O RCD tem sido objeto de estudo e utilização em base e sub-base de pavimentos, concretos magros sem fim estrutural, fabricação de blocos de vedação dentre outras aplicações. Percebe-se que o mercado dos RCD deve crescer e a sua utilização no concreto se torna essencial, uma vez que cerca de seis bilhões de toneladas/ano são produzidos mundialmente (CARRIJO, 2005).

Dentro deste contexto, visando a possibilidade de utilização dos RCD na execução do CCR para base de pavimentos, são necessárias informações detalhadas sobre o seu comportamento mecânico, objetivo deste trabalho. Isto é condição para aumentar-se o emprego dos agregados de RCD na produção de produtos à base de cimento.

Entendendo-se como uma das propostas do conceito de desenvolvimento sustentável como sendo a desvinculação entre o crescimento e a geração de impactos ambientais, uma contribuição visando este objetivo é a redução do consumo de materiais e matérias-primas naturais para a produção de um mesmo bem. Avanços no processo de construção e reciclagem se fazem necessários através, inclusive, da substituição dos materiais naturais tradicionais por outros igualmente ou mais eficientes, garantindo-se a durabilidade dos produtos.

O estudo das características mecânicas do CCR com agregados reciclados de RCD para pavimentação é, portanto, tema relevante de pesquisa.

3.4 Algumas aplicações de agregados reciclados em pavimentos de concreto

Nos Estados Unidos, em áreas com pouca ou total falta de oferta de agregados naturais dentro dos padrões de qualidade desejada, têm sido executados novos pavimentos de concreto e bases de CCR utilizando-se agregados reciclados de antigos pavimentos de concreto. Também tem sido fator importante de decisão, a redução do custo de transporte e energia na construção destes pavimentos. Outro fator importante é a remoção do RCD, principalmente em áreas urbanas (Yrjanson, 1981).

Algumas entidades americanas desde a década de 1970 vêm pesquisando o assunto, tais como: *U.S. Army Corps of Engineers (Waterways Experiment Station)*, *Iowa Department of Transportation*, *Massachusetts Institute of Technology*, *Minnesota Department of Transportation* e o *Federal Highway Administration*.

O *Iowa Department of Transportation* realizou seu projeto inicial de reciclagem em 1976 na U.S. 75 *Lyon County, Iowa*. Pavimentada em 1934 e duplicada em 1958, teve seu pavimento demolido e o agregado reciclado utilizado nas novas placas de concreto em 1976. Com os objetivos satisfatoriamente atingidos, dois novos projetos foram executados: I-680 *Pottawattamie County, Iowa* com 4,83 km em 1977 e *Iowa Route 2-Taylor & Page County*, com 25,8 km, em 1979.

O *Minnesota Department of Transportation* realizou seu projeto inicial de reciclagem em 1980 na U.S. 59. com extensão de 25,8 km. Este projeto foi um marco na recuperação de pavimentos com utilização de agregados reciclados do antigo pavimento de 1955, devido aos resultados de resistência e qualidade conseguidos (Yrjanson, 1981).

No Estado da Califórnia se reciclam pavimentos de concreto de cimento Portland desde a década de 1970 sendo os primeiros a usar agregado reciclado na execução do CCR como base de pavimentos de concreto.

Também foram utilizados agregados reciclados como sub-base tratada com cimento (Yrjanson,1981).

Na França, duas faixas da auto-estrada norte de Paris foram recuperadas em 1976 e 1977. Com 8,53 km, os agregados reciclados do antigo pavimento de concreto foram utilizados na execução do CCR como base de pavimento com consumo de cimento de 160 kg/m³. Este pavimento suportava o tráfego mais intenso e pesado da França, com cerca de 150.000 veículos por dia, sendo a quantidade de veículos comerciais superior a 20% do volume total (Yrjanson,1981).

Em 1977, o agregado reciclado do antigo pavimento de concreto da pista do Aeroporto Internacional de Jacksonville, Florida, foi utilizado na elaboração de CCR para base do novo pavimento de concreto. Este CCR foi executado com espessura de 15 cm e consumo de cimento de 148 kg/m³ alcançando uma resistência à compressão de 6,9 MPa aos 28 dias e sendo transportado em caminhões basculantes. Como o agregado graúdo natural deveria ser transportado de Miami a uma distância de 564 km, o ganho econômico reciclando o antigo pavimento de concreto foi grande, segundo Yrjanson (1981).

3.5 Dosagem do CCR

O objetivo de uma dosagem de CCR para fins rodoviários é definir a proporção dos materiais necessários na composição dos concretos destinados a construir camadas de base ou sub-base, em pavimentos asfálticos ou de concreto, atendendo a uma dada resistência especificada em projeto.

Este material de construção de obras rodoviárias é um concreto com baixo consumo de cimento, consistência seca e que somente pode ser consolidado através do emprego de pressão gerada externamente à massa. Esta pressão é aplicada por meio de rolos compactadores ou placas vibratórias.

Neste tipo de concreto, a compacidade da mistura fresca é sempre função do tipo de equipamento empregado, da energia de compactação aplicada e do teor de água empregado no seu preparo. A máxima densidade específica teórica possível para uma mistura varia de acordo com o índice de vazios dos agregados e o conteúdo de pasta usado.

A densidade máxima é função do grau de adensamento do concreto e conseqüentemente propicia ganho de resistência ao concreto. Este ganho de resistência com o aumento da água acontece porque a mistura mais úmida facilita a compactação devido a uma melhor acomodação das partículas constituintes resultando numa menor quantidade de vazios (VARGAS, 1977).

Os métodos de dosagem do concreto, independentemente do tipo, visam uma composição mais econômica que compatibilize os materiais disponíveis, os equipamentos para a execução e condições de obra existentes, com as exigências do cálculo estrutural e da vida útil prevista.

“Toda dosagem passa por uma etapa de comprovação, correção e ajuste experimental do traço. O avanço tecnológico tem permitido caracterizar as matérias-primas para concreto de maneira a simplificar a dosagem racional e reduzir a margem de erro. A dosagem deverá ser corrigida posteriormente no laboratório, para chegar à composição definitiva” (BUCHER, 1985).

3.5.1 Caracterização dos Componentes

3.5.1.1 Cimento Portland

Todos os tipos de cimento Portland podem ser utilizados para a execução do CCR (ACI 207,1998; PITTA et al, 1995; DNER, 1992; BUCHER, 1985). Em casos visando um melhor resultado do CCR em função das premissas do projeto, pode-se optar por um cimento com características diferenciadas. Os cimentos utilizados na execução do CCR devem atender às normas técnicas brasileiras quanto aos requisitos mínimos de qualidade.

A escolha do tipo de cimento deverá levar em conta ainda, a disponibilidade existente no local da obra. Devido às dimensões continentais do Brasil, para cada região existe uma disponibilidade maior de um determinado tipo de cimento.

3.5.1.2 Agregados Naturais Britados

Podem ser utilizados agregados de origem natural resultante de britagem ou resíduo inorgânico proveniente de processos industriais (escórias, cinzas etc.) ou ainda, da reciclagem de RCD, desde que atendam aos requisitos quanto à granulometria e dureza. Para um CCR, estes tipos de agregados podem ser utilizados conjuntamente desde que previstos na dosagem e reunidos de maneira controlada antes da mistura (BUCHER, 1985).

A procedência dos agregados normalmente deve ser de rochas de boa qualidade e atender às especificações técnicas quanto às características físicas e químicas bem como à ausência de matéria orgânica nociva e de torrões de argila.

Pitta (1995) recomenda quanto à granulometria, utilizar agregados com dimensão máxima de 38 mm. Apesar de não haver restrições quanto a utilização de agregados com dimensão máxima característica de 38 mm, tem-se notado alguma dificuldade quando da compactação do concreto e posterior regularização da superfície. Neste caso, a recomendação é a utilização de agregados com dimensão máxima característica de 19 mm.

Tradicionalmente, o agregado total é composto de uma mistura de uma ou mais frações de agregado miúdo com agregado graúdo na proporção necessária para se conseguir uma curva granulométrica de maneira a “encaixá-lo” em faixas granulométricas pré-estabelecidas empiricamente para misturas de CCR.

Diversos autores (PITTMAN *et al.*, 1998; DIAZ, 1993; ABREU, 2002) estudaram as curvas granulométricas para aplicação em CCR de acordo com

as dimensões máximas dos agregados utilizados. Outros autores definiram faixas granulométricas, ao invés de curvas, por entenderem que são permitidas tolerâncias maiores da curva granulométrica a ser utilizada na dosagem.

3.5.1.3 Água

A água utilizada na mistura deve ser isenta de substâncias prejudiciais à hidratação do cimento. Pressupõem-se adequadas as águas potáveis. O CCR é muito sensível às variações da quantidade de água utilizada na dosagem. A falta aumenta o risco de segregação, dificultando a compactação e o acabamento superficial enquanto que o excesso provoca instabilidade da mistura durante a compactação. Em ambos os casos, causam diminuição da resistência mecânica e problemas de trabalhabilidade.

3.6 Principais estudos com CCR realizados no Brasil

Balbo (1993) estudou as propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento como base de pavimentos. Este trabalho desenvolvido nas instalações dos Serviços de Pesquisas e Consultoria Técnica da Indústria Suíça do Cimento (TFB) e da Rodovias em Concreto S.A. (Betonstrassen AG) situadas em Wildegg além da Escola Politécnica de Zurique (ETH-Z). Utilizou-se material britado de origem granítica de São Paulo e brita graduada de origem calcária procedente de depósito típico alpino situado em Hasli (Suíça).

O cimento selecionado foi o “Portlandzement” fabricado pela JURA-ZEMENT-FABRIKEN situada em Wildegg por ser o cimento que mais se aproximava da especificação brasileira para o CII E-32. O teor de cimento estabelecido foi de 4% em relação ao peso total dos agregados. Os principais resultados das propriedades mecânicas da BGTC obtidos por Balbo (1993) são apresentados na Tabela 3.1

Uma das constatações observadas neste trabalho foi que a ruptura da brita graduada tratada com cimento (BGTC) quando solicitada à tração ocorre a

níveis de deformação bastante baixos. A BGTC é um material bastante frágil, que sofre deformações de pequena magnitude antes de sua ruptura.

Tabela 3.1: Resultados obtidos para a BGTC (BALBO, 1993)

Ensaio	Resultados Obtidos	
	7 Dias	28 Dias
Módulo de elasticidade secante em compressão (MPa)	13.471	20.134
Módulo de elasticidade tangente em compressão (MPa)	14.955	21.130
Módulo de elasticidade secante em tração (MPa)	13.782	20.224
Módulo de elasticidade tangente em tração (MPa)	16.051	22.906
Resistência à compressão (MPa)	8,08	13,25
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,50	0,93

Diaz (1993) apresenta em seu trabalho uma pesquisa de laboratório sobre CCR para pavimentação onde foram moldados seis mil e seiscentos corpos-de-prova para determinarem-se as principais características do material.

Foram estudados traços com consumo de cimento de 80 kg/m³ até 320 kg/m³ para cento e setenta tipos de CCR como base de pavimentos e revestimento. Fazem parte do estudo, alguns traços estudados para algumas estradas brasileiras pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, dentre as quais pode-se destacar a estrada da Serra do Rio do Rastro em Santa Catarina.

Esta estrada liga a cidade de Lauro Miller ao alto da serra, tendo sido utilizado o CCR como base de pavimento de concreto nos sete quilômetros de serra. Ela apresenta características no que diz respeito à geometria da via singulares, com curvas de raio pequeno e rampas com inclinação superiores a 10% (Figura 3.1). Foi utilizado 140 kg/m³ de cimento pozolânico e os resultados de resistência à compressão nos 4.900 m³ de CCR executados são apresentados na Tabela 3.2.

Figura 3.1: Vista geral do traçado geométrico da estrada da Serra do Rio do Rastro

Tabela 3.2: Resistência à compressão do CCR empregado na estrada da Serra do Rio do Rastro

Ensaio	Resultados Obtidos	
	3 Dias	7 Dias
Resistência à compressão (MPa)	4,7	6,7

Foi utilizado no estudo dos traços em laboratório, cimento CPE-32, atualmente denominado CPE-32 e agregados de origem granítica. As dosagens foram realizadas com vários consumos de cimento destacando-se neste trabalho, os principais resultados obtidos com 80 kg/m³ (Tabela 3.3) e 120 kg/m³ (Tabela 3.4), para energias normal, intermediária e modificada de compactação.

Tabela 3.3: Principais resultados obtidos por Diaz (1993) com CCR com consumo de cimento de 80 kg/m³

Propriedade Medida para consumo de cimento de 80 kg/m³		Energia de Compactação								
		Normal			Intermediária			Modificada		
		Granulometria								
		F	M	G	F	M	G	F	M	G
Umidade Ótima (%)		6,80	6,60	6,50	6,00	6,00	5,50	5,50	5,50	5,10
Massa Específica Aparente Seca Máxima (t/m³)		2,146	2,198	2,269	2,175	2,244	2,292	2,228	2,292	2,329
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	2,00	2,30	2,70	3,10	2,80	4,00	3,20	4,40	4,60
	7 dias	2,30	3,20	3,90	3,70	4,00	5,80	4,20	5,10	7,10
	28 dias	3,50	4,30	4,30	4,60	6,10	6,80	5,50	6,80	9,00
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	3 dias	0,30	0,40	0,50	0,35	0,40	0,55	0,40	0,65	0,70
	7 dias	0,55	0,60	0,75	0,50	0,70	0,90	0,60	0,70	0,75
	28 dias	0,65	0,75	0,85	0,60	0,80	1,10	0,70	0,90	1,15
Módulo de elasticidade (GPa)		-	11,70	13,20	7,10	10,70	8,00	8,30	9,40	20,00
Absorção de água (%)		-	-	6,80	9,70	7,80	-	-	-	-
Índice de Vazios (%)		-	-	15,60	20,60	17,30	-	-	-	-

Tabela 3.4: Principais resultados obtidos por Diaz (1993) com CCR com consumo de cimento de 120 kg/m³

Propriedade Medida para consumo de cimento de 120 kg/m³		Energia de Compactação								
		Normal			Intermediária			Modificada		
		Granulometria								
		F	M	G	F	M	G	F	M	G
Umidade Ótima (%)		6,70	6,50	6,30	6,00	5,80	5,30	5,40	5,20	4,90
Massa Específica Aparente Seca Máxima (t/m³)		2,169	2,224	2,286	2,204	2,265	2,315	2,247	2,307	2,344
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	4,40	4,70	5,40	5,50	5,90	8,40	6,60	9,70	9,30
	7 dias	5,30	6,00	8,00	7,30	7,70	10,70	8,60	11,50	12,70
	28 dias	7,30	7,90	9,70	9,20	9,20	14,60	12,00	13,80	16,50
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	3 dias	0,75	0,75	1,05	0,80	0,95	1,15	0,90	1,05	1,25
	7 dias	1,05	1,10	1,35	1,00	1,30	1,40	1,25	1,55	1,65
	28 dias	1,20	1,60	1,70	1,30	1,50	2,20	1,45	1,65	2,30
Módulo de elasticidade (GPa)		16,10	18,10	16,50	12,50	16,00	22,10	20,60	20,70	23,70
Absorção de água (%)		-	6,90	6,20	6,30	-	5,70	7,40	6,00	5,10
Índice de Vazios (%)		-	15,60	14,40	14,40	-	13,40	16,50	13,90	12,00

Trichês (1993) estudou o CCR para diâmetro máximo dos agregados de 19 mm sendo a mistura composta de três porcentagens diferentes de areia, ou seja: 30%, 40% e 50% resultando em três granulometrias chamadas de grossa (G),

média (M) e fina (F) respectivamente. Como agregado miúdo foi utilizado areia natural de rio e como agregado graúdo foi utilizado a brita de origem granítica. Este estudo inclui também a influência das três energias de compactação: a energia do Proctor Normal (N), a Intermediária (I) e a Modificada (M) correspondente a 5,8 kg cm/cm³, 12,3 kg cm/cm³ e 26,5 kg cm/cm³ respectivamente. O cimento utilizado foi o CPE-32 com consumos variando de 80 kg/m³ a 320 kg/m³.

Os principais resultados obtidos por Trichês (1993) para as propriedades mecânicas estudadas estão relacionadas na Tabela 3.5 relativos às dosagens com consumo de cimento 80 kg/m³ e na Tabela 3.6 para as dosagens com consumo de cimento 120 kg/m³. Trichês estudou ainda o comportamento em fadiga do CCR, não sendo esse objeto do presente estudo.

Tabela 3.5: Principais resultados obtidos por Trichês (1993) com CCR com consumo de cimento de 80 kg/m³

Propriedade Medida para consumo de cimento de 80 kg/m³		Energia de Compactação								
		Normal			Intermediária			Modificada		
		Granulometria								
		F	M	G	F	M	G	F	M	G
Umidade Ótima (%)		6,80	6,50	6,50	6,00	5,80	5,90	5,50	5,30	5,20
Massa Específica Aparente Seca Máxima (t/m³)		2,140	2,192	2,248	2,187	2,248	2,278	2,212	2,272	2,320
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	2,10	2,60	2,80	2,80	3,40	3,80	3,60	4,40	4,70
	7 dias	2,60	3,90	4,00	3,20	4,70	4,90	4,00	5,30	6,00
	28 dias	3,90	4,40	5,10	4,60	5,60	6,30	5,20	6,60	7,20
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	3 dias	0,30	0,35	0,50	0,30	0,40	0,40	0,40	0,50	0,60
	7 dias	0,45	0,50	0,65	0,50	0,45	0,55	0,50	0,65	0,85
	28 dias	0,60	0,75	0,95	0,70	0,80	0,80	0,60	0,90	1,05
Módulo de elasticidade (GPa)		7,80	7,80	11,00	8,90	9,60	11,30	7,40	13,40	12,60
Absorção de água (%)		-	-	7,60	-	-	-	7,90	-	-
Índice de Vazios (%)		-	-	17,10	-	-	-	17,50	-	-

Tabela 3.6: Principais resultados obtidos por Trichês (1993) com CCR com consumo de cimento de 120 kg/m³

Propriedade Medida para consumo de cimento de 120 kg/m³		Energia de Compactação								
		Normal			Intermediária			Modificada		
		Granulometria								
		F	M	G	F	M	G	F	M	G
Umidade Ótima (%)		6,70	6,40	6,30	5,80	5,50	5,60	5,30	5,20	5,00
Massa Específica Aparente Seca Máxima (t/m³)		2,165	2,215	2,268	2,211	2,263	2,300	2,238	2,290	2,337
Resistência à Compressão (MPa)	3 dias	4,40	5,60	6,90	5,90	6,90	8,00	6,40	7,40	9,00
	7 dias	5,90	7,10	8,00	7,20	10,20	9,90	8,50	9,00	12,10
	28 dias	7,00	9,20	10,70	8,40	12,00	12,60	9,60	13,20	14,90
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	3 dias	0,55	0,80	1,20	0,70	0,90	1,20	0,80	1,05	1,30
	7 dias	0,90	1,20	1,60	0,95	1,20	1,45	1,05	1,25	1,75
	28 dias	1,05	1,50	1,80	1,05	1,55	1,85	1,20	1,55	2,20
Módulo de elasticidade (GPa)		12,80	16,50	18,30	11,40	18,00	19,00	17,10	18,60	21,90
Absorção de água (%)		7,80	7,10	5,90	8,40	6,10	5,10	7,60	6,30	5,50
Índice de Vazios (%)		17,20	15,90	13,50	17,40	13,90	12,00	16,90	14,50	12,90

Abreu (2002) estudou a viabilidade do emprego do CCR como camada de revestimento produzidos com cimento de alta resistência inicial (CPV- ARI), cimento composto com escória (CPII E 32) e cimento de escória de alto forno (CPIII E 32) para diversos consumos de cimento. Foi utilizado como agregado miúdo a areia natural e como agregado graúdo brita de origem granítica. Foi utilizada ainda uma mistura granulométrica denominada misto calcário extraída da jazida da fábrica de cimento Ciminias, localizada em Sorocaba-SP, com a finalidade de corrigir a curva granulométrica do agregado total empregado na dosagem dos CCR.

Foram estudadas as principais propriedades mecânicas do CCR para a energia normal de compactação (equivalente a 0,59 J/cm³) e consumos de cimento a partir de 250 kg/m³ para o CPV- ARI e para 300 kg/m³ com a utilização do CPII-E-32 e o CPIII-E-32. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3.7: Principais resultados obtidos por Abreu (2002)

Tipo de cimento	Consumo de cimento (kg/m³)	Massa específica aparente seca máxima (kg/m³)	Resistência média à compressão (MPa)		Resistência média à tração na flexão (MPa)		Módulo de elasticidade estático (GPa)
		Energia Normal	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	28 dias
CPV-ARI PLUS/RS	250	2.315	35,0	45,4	4,7	5,5	32,44
	300	2.310	45,8	52,1	5,5	6,5	34,62
CPII E 32	300	2.305	31,7	43,1	5,0	5,5	33,39
CPIII E 32	300	2.315	33,5	44,7	4,9	6,5	34,24

3.7 Estudos sobre CCR com agregados reciclados

Cho e Yeo (2004) estudaram o uso de agregados reciclados de concreto no CCR na Coreia. Foi utilizado um tipo de agregado reciclado graúdo sendo que a composição do agregado miúdo variou em 50% com brita natural e 100% somente com reciclados, conforme Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Dosagem do CCR

Consumo de cimento (kg/m³)	Água (kg/m³)	Agregado graúdo (kg/m³)	Agregado miúdo (kg/m³)
170	170	1100	620

Na Coreia, o CCR é utilizado como base para pavimento de concreto e o critério de qualidade é definido pela resistência à compressão com valor mínimo de 4,9 MPa aos sete dias. Na Tabela 3.9 são apresentados os resultados obtidos para as diversas dosagens.

Tabela 3.9: Resultados obtidos para o CCR com diferentes composições de agregados miúdos

Agregado miúdo	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à tração na compressão diametral (MPa)		Resistência à tração na flexão (MPa)		Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
100% natural britado	7,8	10,9	1,6	2,0	2,6	2,9	25,10	32,10
50% natural britado + 50% reciclado	6,1	11,5	1,4	1,8	2,2	2,7	21,70	29,40
100% reciclado	5,1	9,3	1,3	1,6	2,0	2,3	17,30	26,70

Independentemente do tipo de composição utilizada para os agregados miúdos dos CCR estudados, todos os resultados obtidos para a resistência à compressão ficaram acima do mínimo especificado na Coreia.

Para a *Califórnia Transportation (CALTRANS)*, a resistência à compressão mínima sugerida para os CCR é de 4,2 MPa (Kim and Parker, 1992) e todos os resultados obtidos atendem também a esta premissa.

Comparando-se o resultado da resistência à compressão utilizando-se 100% agregado miúdo natural britado com 100% com agregado miúdo reciclado, verifica-se uma diferença de cerca de 40% nas resistências obtidas aos sete dias. Cho e Yeo (2004) concluem que isto ocorreu devido às dificuldades de controle de qualidade causado pela maior absorção de água (Figura 3.2) e menor aderência da argamassa com a superfície dos agregados reciclados. Concluíram também que, quando comparado com os agregados naturais britados, os agregados reciclados apresentam menor massa específica (Figura 3.3).

Figura 3.2: Absorção dos vários tipos de agregados utilizados na composição do CCR
(adaptado de Cho e Yeo, 2004)

Figura 3.3: Massa específica dos vários tipos de agregados utilizados na composição do CCR
(adaptado de Cho e Yeo, 2004)

Os demais resultados também apresentaram uma queda de resistência em relação ao CCR com agregados naturais britados, porém estas diferenças não foram tão significativas quanto aos obtidos na resistência à compressão.

Cho e Yeo (2004) estudaram ainda vários traços de CCR com agregados reciclados de concreto com porcentagens diferenciadas de papel, plástico, madeira, asfalto, blocos etc. Foram medidas as resistências mecânicas para diversos CCR com composição variável de materiais estranhos ao concreto misturados aos agregados reciclados de concreto (Tabela 3.10).

Tabela 3.10: Resistências obtidas para o CCR com diferentes quantidades de materiais estranhos ao concreto

CCR com impurezas (%)	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à tração na compressão diametral (MPa)		Resistência à tração na flexão (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
0	5,78	11,36	1,61	1,75	2,54	2,89
10	5,37	9,63	1,35	1,66	2,08	2,45
25	4,51	8,62	1,08	1,57	1,75	2,38

Para 25% de materiais estranhos, a resistência à compressão resultou abaixo de 4,9 MPa aos sete dias, mínimo exigido na Coréia. Para as demais resistências, existe uma grande diferença de resultados aos 7 dias para as porcentagens estudadas porém esta diferença não é significativa aos 28 dias.

Cho e Yeo (2004) estudaram ainda a influência do aumento da porcentagem de impurezas no CCR na resistência à compressão (Figura 3.4). Entendam-se como impurezas materiais como papel, plástico, madeira etc. Observe-se que para o CCR com 10% e o CCR com 25% de impurezas ocorreram perdas de resistência de 7% e 22%, respectivamente, em relação ao CCR sem impurezas. O trabalho aponta para a necessidade de se pesquisar como estes materiais afetam as propriedades mecânicas do CCR. O trabalho deixou em aberto a questão da densidade do CCR com materiais reciclados e sua influência nas propriedades mecânicas, quando foram elaboradas misturas com porcentagens diferentes de impurezas ao concreto.

Figura 3.4: Resultados de CHO e YEO (2004) para a resistência à compressão aos 7 dias para CCR com agregados de RCD com diferentes porcentagens de impurezas

Cho e Yeo (2004) concluíram que o agregado reciclado de concreto pode ser utilizado no CCR para pavimentação, pois não existem diferenças significativas de resistência para maiores idades. Deve ser ressaltado, todavia, que os autores mencionados, bem como outros, não estudaram até o presente momento o comportamento à fadiga destes tipos de CCR com RCD para que se pudesse, categoricamente, afirmar sua perfeita conveniência como material de pavimentação em comparação aos CCR tradicionais com agregados naturais britados.

4 METODOLOGIA E MATERIAIS EMPREGADOS NA PESQUISA

Uma metodologia de dosagem de concreto, independentemente de seu tipo, tem por objetivo compatibilizar os materiais disponíveis com os equipamentos destinados à sua produção e execução no campo, com as condições da obra e com as exigências estruturais previstas no projeto visando a se conseguir a composição mais econômica (DIAZ, 1993).

Nos concretos plásticos, a maior parte dos vazios existentes entre os agregados é ocupada pela pasta (cimento e água). Para este tipo de concreto, quanto menor a quantidade de água, maior será a sua resistência mecânica.

Nos concretos secos como o CCR, isto não ocorre, existindo a presença de ar em quantidade significativa na mistura. Neste caso, a metodologia de dosagem consiste em encontrar a melhor mistura entre os agregados propiciando o menor volume de vazios possíveis, o que é definido por meio do ensaio de compactação, definindo curvas que relacionam o teor de umidade da mistura com sua massa específica aparente seca obtida para um dado nível de energia de compactação aplicada.

A máxima massa específica teórica atingível (compacidade) para uma dada mistura varia com o índice de vazios dos agregados e o conteúdo de pasta utilizado. Ela é obtida num ponto ótimo de umidificação onde a compacidade e a resistência mecânica é máxima, exceto no caso de misturas do tipo brita graduada tratada com cimento (BALBO, 1993).

Adotou-se aqui a metodologia proposta por Trichês (1993), que foi desenvolvida inicialmente com o objetivo de dosar o CCR para barragens onde o consumo de cimento é menor e consequentemente as resistências são baixas.

Posteriormente, esta metodologia foi adotada por Abreu (2002), com o objetivo de dosar o CCR para bases e revestimentos de pavimentos rodoviários. Neste trabalho foi empregada para dosagens de CCR que atendam às necessidades rodoviárias como base de pavimentos asfálticos ou de concreto.

O método de dosagem utilizado é baseado no fato de que, para uma determinada combinação de agregados com cimento com características conhecidas e água, a resistência mecânica do CCR moldado na umidade ótima é obtida em função do tipo de cimento utilizado, do teor de umidade empregado e da energia de compactação empregada na moldagem (BUCHER, 1985).

Para facilitar o entendimento, segue abaixo o roteiro seqüencial do método adotado neste trabalho:

- Definição do padrão de resistência à tração na flexão (2,5 MPa);
- Escolha do tipo de cimento empregado;
- Definição da distribuição granulométrica apropriada;
- Coleta de cinco amostras representativas dos agregados reciclados de RCD;
- Seleção de três amostras de agregados reciclados de RCD por meio do critério de separação densitária ;
- Definição da variação do consumo de cimento;
- Definição da energia de compactação;
- Determinação da umidade ótima;
- Dosagem inicial do CCR com agregado natural e para cada tipo de agregado reciclado;
- Definição do consumo de cimento para cada CCR através do ábaco consumo x resistência à tração na flexão (resistência desejada de 2,5MPa);
- Definição final da dosagem do CCR para cada tipo de agregado;

- Moldagem dos corpos-de-prova para realização dos ensaios (resistência à compressão, tração na flexão, módulo de elasticidade estático e por propagação de onda ultra-sônica). Determinação da absorção de água inclusive por capilaridade, massa específica e porosidade;
- Estudo das modificações granulométricas dos agregados naturais britados e dos tipos de agregados reciclados estudados.

4.1 Principais procedimentos de dosagem

Os procedimentos de dosagem para a o CCR utilizando agregados naturais britados ou reciclados, são os mesmos definidos por Abreu (2002) descritos na seqüência.

4.1.1 Definição do padrão de resistência em função do projeto

No caso de pavimentos utilizando o CCR como base, principalmente para casos de revestimentos asfálticos, os esforços aplicados na base serão de tração na flexão, sendo as variáveis consideradas para o dimensionamento, portanto, a resistência à tração na flexão do CCR e espessuras de camadas (critério multicamadas).

O valor de resistência à tração na flexão para uma determinada idade do CCR (geralmente vinte e oito dias em obras rodoviárias, podendo ser em prazo menor para obras urbanas e prazo maior para aeroportos, portos e indústrias) será fornecido para o tecnologista de concreto em obra pelo projeto.

No caso da presente pesquisa optou-se por estudar padrão de resistência adequado para CCR empregado como base de pavimentos asfálticos rígido-híbridos (BALBO, 2005; BALBO, 2007). Assim, fixou-se um valor de 2,5 MPa de resistência à tração na flexão pelo fato de tal valor atender vários padrões de volume de tráfego comercial em rodovias, sendo o prazo de ganho dessa resistência também fixado em 28 dias para emprego de cimento Portland tipo CP-III-40.

4.1.2 Escolha do tipo de cimento empregado

Não existem restrições quanto ao tipo de cimento Portland utilizado na execução do CCR. No Brasil têm sido utilizados diferentes tipos de cimento nas obras rodoviárias. Na rodovia da Serra do Rio do Rastro, com 7,1 km de extensão no trecho de serra, em Santa Catarina, foi utilizado cimento pozolânico (DIAZ, 1993), de fabricação típica na região Sul. No Rodoanel Metropolitano Mário Covas, em seu trecho oeste com 32 km, foi utilizado o CP II E 32. Em alguns terminais e corredores de ônibus do projeto Passa - Rápido da PMSP foi empregado o cimento CP III E 40.

A escolha do cimento deverá ser definida em função da disponibilidade de obtenção do produto na região de aplicação do CCR, nas quantidades previstas no cronograma físico executivo da obra. O cimento deverá atender aos padrões de qualidade indicados pelas normas vigentes. No caso específico dessa pesquisa empregou-se o CP III E 40 RS por ser bastante disponível no mercado do Sudeste.

4.1.3 Definição da distribuição granulométrica apropriada

A primeira consideração a ser analisada para a seleção da distribuição granulométrica é quanto ao tipo de aplicação do CCR no pavimento. Para revestimentos, a distribuição granulométrica deve comportar grãos menores com o objetivo de propiciar uma textura superficial mais “fechada”, mais resistente ao efeito de abrasão e que evite ou minimize a segregação dos materiais (ABREU, 2002). Para bases, a mistura pode apresentar consumo menor de cimento, porém, deverá atender às resistências mecânicas definidas em projeto. Além disso, a questão da textura superficial é bem mais maleável posto que o pavimento tenha ainda uma camada superior de revestimento.

A granulometria é estudada para se obter o menor índice de vazios possível (TRICHÊS, 1993) uma vez que tal critério colabora para um ganho de resistência maior (ganho de massa específica para a mistura compactada) e menor consumo de cimento, o que se trata de um critério de economia da obra já que, em termos de desempenho, nada ou pouco se altera. De maneira geral, a curva granulométrica do

CCR deve ser ajustada em laboratório escolhendo-se a que melhor atenda às especificações técnicas desejadas no projeto de pavimentação (DIAZ, 1993).

A Figura 4.1 apresenta três curvas granulométricas, denominadas por Pittman *et al.* (1998) como granulometria fina, média e grossa, para dimensões máximas características de 25 mm, para aplicações em CCR. Neste trabalho foram adotadas as curvas de Pittman *et al.* (1998), utilizadas inclusive por Abreu (2002) e Diaz (1993) para dimensão máxima característica de 25 mm, visto que, especialmente no estudo de Abreu (2002) tais misturas bem graduadas permitiram atingir elevadíssimas resistências para o CCR mesmo com consumos reduzidos de cimento em relação a padrões normalmente conhecidos no meio técnico.

Figura 4.1: Curvas granulométricas para dimensão máxima característica de 25mm
(Pittman *et al.*, 1998)

Embora tais justificativas para a escolha desse tipo de distribuição granulométrica ressoem razoáveis para o caso de agregados britados naturais, conforme pesquisas anteriores já mencionadas, toma-se também como alternativa para os RCD empregados nesse trabalho, ao menos como hipótese, já que não se objetivou aqui estabelecer distribuições granulométricas específicas para o RCD, coisa que se recomenda para investigações mais detalhadas no futuro.

4.1.4 Definição do consumo de cimento

Estabelecido o tipo de cimento, a granulometria e a energia de compactação normal para os corpos-de-prova a serem moldados, a resistência à tração na flexão a ser atingida (e também anteriormente especificada) deveria ser atendida para um dado consumo de cimento e uma dada umidade de compactação.

Para esta pesquisa, a definição da faixa de estudo de valores de consumo de cimento para o caso dos agregados naturais britados pautou-se pelos estudos de Diaz (1993), Trichês (1993) e Abreu (2002) que já haviam estudado resistências e consumos para granulometrias descontínuas de CCR. Tais resultados estão apresentados de modo sumarizado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Resultados de resistência à tração na flexão *versus* consumo de cimento de estudos anteriores.

Consumo de cimento (kg/m ³)	Estudo de Hurtado-Diaz (1993) – 28 dias ($\varnothing_{\max} = 19$ mm)	Estudo de Trichês (1993) – 28 dias ($\varnothing_{\max} = 19$ mm)
80	0,90	0,80
120	1,43	1,55
160	2,40	2,20
200	3,00	2,90
240	3,43	3,40
280	4,05	4,15
320	4,46	4,55

Com base em tais resultados, e considerando que a pesquisa visava comparar os CCR moldados com agregados naturais britados e RCD, tomou-se por base estudar para os agregados naturais britados a faixa de variação do consumo de cimento entre 90 a 130 kg/m³ de concreto, pois, havia expectativa de se atingir nessas condições resistências à tração na flexão entre 1,0 e 1,8 MPa, aproximadamente, o que seria ajustado para mais caso necessário.

Acrescentando mais uma justificativa a tal escolha, na obra de duplicação das Marginais da Rodovia Castello Branco (SP-280) no ano de 2001¹ a base em CCR para os pavimentos de concreto foi preparada com cimento CP II E 32 e exatamente os mesmos agregados naturais britados empregados nesta pesquisa (mesma origem), sendo que o consumo de cimento foi no caso de 100 kg/m³ de concreto, a resistência à tração na flexão aos 28 dias resultou 1,5 MPa e a resistência à compressão resultou 6,7MPa. O volume de concreto aplicado foi de 50.151,68 m³ sendo a massa específica aparente seca máxima de 2.237,6 kg/m³ e a umidade ótima de 6,0%, segundo a ABCP (2001).

O procedimento de dosagem do CCR para os agregados naturais britados foi, neste trabalho, portanto:

- variar o consumo de cimento em 90, 110 e 130 kg/m³ de concreto;
- para cada caso, variar a umidade da mistura de 5,5 a 7,5 %, de meio em meio ponto porcentual;
- determinar o diagrama massa específica aparente seca *versus* umidade de moldagem para acerto da umidade ótima;
- moldagem de três corpos-de-prova prismáticos para cada consumo de cimento na umidade ótima respectiva encontrada;
- traçar a curva consumo versus resistência para a determinação do consumo definitivo de cimento na mistura piloto.

Definido o critério de escolha dos lotes de agregados reciclados de RCD a serem analisados neste trabalho, adotou-se para estes, a mesma metodologia de dosagem do CCR utilizada para os agregados naturais britados, sendo que a faixa de consumo de cimento a ser estudada no caso dos RCD foi alterada para entre 110 e

¹ O autor do presente trabalho fez parte da equipe de engenheiros responsáveis pela obra mencionada na Rodovia Castello Branco como gerente de contrato pela Associação Brasileira de Cimento Portland.

150 kg/m³ tendo em vista a expectativa de que a substituição de 50% ou 100% do agregado natural britado por RCD implicaria em aumento de consumo de cimento no CCR com RCD para se atingir a mesma resistência do traço piloto.

4.2 Corpos-de-prova com dimensões reduzidas e energia de compactação

Para a medida da resistência à compressão do CCR utilizando agregados naturais britados, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 150 x 300 mm e para a medida da resistência à tração na flexão, foram utilizados corpos-de-prova prismáticos com dimensões 150 x 150 x 500 mm, conforme preconiza a norma NBR 5738.

Para o CCR com os agregados reciclados, a medida da resistência à compressão foi realizada utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com dimensões reduzidas 100 x 200 mm conforme procedimentos preconizados na norma NBR 5738. Para a medida da resistência à tração na flexão, foram utilizados corpos-de-prova 100 x 100 x 400 mm tomando-se como base o trabalho de Cervo *et al* (2004) apresentado no 46º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON.

Cervo *et al* (2004) confrontaram os resultados de resistência à tração na flexão para corpos-de-prova prismáticos de dimensões convencionais (150 x 150 x 500 mm) com valores obtidos para amostras com dimensões reduzidas (100 x 100 x 400 mm) concluindo pela viabilidade de sua utilização sem necessidade de fatores de correção.

O estudo realizado por Cervo *et al* (2004) foi baseado em concretos convencionais e concretos de alto desempenho. Para o CCR, onde a consolidação é feita através de compactação externa, foram confrontados neste trabalho, os resultados dos corpos-de-prova moldados com dimensões reduzidas 100 x 100 x 400 mm com os moldados com dimensões 150 x 150 x 500 mm para verificar a sua viabilidade.

A energia de compactação utilizada foi a normal, quando da elaboração dos corpos-de-prova cilíndricos 150 x 300 mm para a determinação das resistências à compressão axial, para cada consumo de cimento estudado. São necessários 30 golpes por camada com o soquete de 4,536 kg e altura de queda de 45,7 cm. O material deve ser distribuído em cinco camadas.

Para os corpos-de-prova prismáticos, são necessários 160 golpes por camada com o mesmo soquete, quando a compactação do CCR é realizada em moldes de 150 x 150 x 500 mm para a verificação da resistência à tração na flexão. O material deve ser distribuído em duas camadas.

Há uma significativa influência da energia de compactação (normal, intermediária e modificada) nas propriedades do CCR no estado fresco e endurecido. Trichês (1993) e Díaz (1993) mostraram em seus trabalhos que a energia de compactação influencia, para um mesmo traço, a massa específica aparente seca do CCR.

A energia potencial (E_p) aplicada para a compactação da massa fresca no corpo-de-prova é dada pela fórmula:

$$E_p = \frac{P.h.n_g.n_c}{V} \quad [4.1]$$

onde:

- P = Peso do soquete;
- h = altura de queda do soquete;
- n_g = número de golpes;
- n_c = número de camadas;
- V = volume do corpo-de-prova.

Como a energia potencial aplicada em relação ao volume é a mesma para os corpos-de-prova em relação ao volume com dimensões reduzidas, definindo-se o número de camadas, acha-se o número de golpes necessários. Para os corpos-de-prova com dimensões reduzidas foram utilizados soquetes com peso de 2,5 kg e altura de queda de 30 cm.

Pode-se destacar ainda que esta possibilidade represente uma economia de cerca de 60% do material necessário para moldagem, equipamentos também de dimensões reduzidas e, portanto, mais econômicos, leves, acessíveis, menor peso da amostra (ou amostra + molde), consequentemente menor quantidade de mão-de-obra, menor espaço ocupado para armazenamento dos corpos-de-prova no laboratório ou em obra entre outras vantagens. De acordo com o exposto, conclui-se que além da viabilidade técnica, esta possibilidade representa menor custo de ensaio, seja para dosagem ou controle tecnológico.

4.3 Coleta de amostras representativas dos agregados reciclados

Foram coletadas amostras representativas de pedrisco (brita 0) e brita (brita 1 e 2) de cinco lotes de RCD da Usina URBEN Tecnologia Ambiental localizada em São Bernardo do Campo, região do ABC paulista.

Esta usina tem capacidade de produção de cerca de 40m³/h. O volume de RCD recebido é de 140 m³/dia. A área da usina é de 7.200 m². A alimentação é feita com partículas com até 70 cm e a cominuição através de britador de impacto. A triagem das impurezas é feita no recebimento das cargas, no pátio e nas correias transportadoras. A classificação por tamanho é feita através de peneiras com malha de 4,8; de 9,5 e de 25 mm. São fabricados areia, pedrisco (brita zero), brita (brita 1 e 2 misturadas), rachão e bica corrida. Trabalham no processo 6 funcionários operacionais e 1 gerente.

Neste trabalho, chama-se apenas por brita a mistura de agregados reciclados de RCD passante na peneira 25 mm e retida na peneira 4,8 mm (mistura de brita 1 e 2).

Esta usina, como as demais no Brasil, trabalham com dois tipos de produtos: cinza, produto com predominância visual de materiais à base de cimento; e vermelho, o produto com predominância visual de materiais cerâmicos. A origem dos RCD para formação de cada lote é:

- Lote 1 – demolição de placas de concreto do Corredor de Trólebus (Figura 4.2)
- Lote 2 – demolição de estrutura de posto de gasolina (Figura 4.3)
- Lote 3 – demolição de construção (misto) (Figura 4.4)
- Lote 4 – demolição de construção (predominância cerâmica) (Figura 4.5)
- Lote 5 – demolição de construção (predominância cerâmica) (Figura 4.6)

Figura 4.2: Lote 1 - placas de concreto

Figura: 4.3: Lote 2 - estrutura do posto

Figura 4.4: Lote 3 – material misto

Figura 4.5: Lote 4 – material cerâmico

Figura 4.6: Lote 5 – material cerâmico

A massa representativa de cada tipo de agregado (brita 0 e brita, para cada um dos cinco lotes) foi definida a partir da teoria de Pierre Gy, com amostragem mínima de aproximadamente 600 kg, considerando-se as premissas apresentadas.

A cada dia de produção, em intervalos de 20 minutos, foram coletados na saída da correia transportadora, 20 kg de cada tipo de material (brita 0 e brita). Cada lote foi coletado no prazo médio de dois dias, de acordo com a produção da usina. Este método de amostragem é conhecido como sistemático com incrementos coletados em intervalos regulares de tempo (LUZ *et al.*, 2004).

A cada 20 minutos, o responsável pela coleta distribuía os 20 kg de material, de maneira uniforme e ininterrupta ao longo de uma pilha alongada com seção triangular, em camadas sucessivas e em direções alternadas conforme ilustram as Figuras 4.7 a 4.11.

Ao final da execução de cada lote (duas pilhas com 600 kg cada), com o objetivo de garantir uma boa homogeneização, as extremidades foram retiradas e redistribuídas novamente em direções alternadas. Do trecho central de cada pilha, foram retiradas amostras com 50 kg e levadas para o laboratório para execução de ensaios de caracterização física incluindo o de separação em meio denso com utilização do equipamento *Sink and Float*. O resto de cada amostra foi depositado em sacos e transportado para o laboratório para utilização nos demais ensaios.

Figura 4.7: Lote 1 – início de coleta

Figura 4.8: Lote 2 – lançamento dos incrementos

Figura 4.9: Lote 3 – amostra coletada

Figura 4.10: Lote 3 – amostra ensacada

Figura 4.11: Lote 5 – brita coletada

4.4 Cálculo da massa mínima da amostra – Teoria de Pierre Gy

A massa mínima da amostra foi determinada com base na teoria de Pierre Gy apresentada no item 2.4 deste trabalho.

4.4.1 Determinação de Q (fator de composição mineralógica)

Considerando-se que o material bruto já passou por um processo prévio de triagem, pode-se considerar que praticamente todo material da amostra é de interesse.

Os procedimentos comentados abaixo, foram utilizados para os cinco lotes de agregados reciclados estudados, de onde foram selecionados três tipos: um mais denso, um intermediário e um menos denso.

Para os valores de $x = 99\%$, $p_a = 1,25 \text{ g/cm}^3$ e $p_b = 0,7 \text{ g/cm}^3$, da equação [2.3] tem-se $Q = 123,21 \text{ g/cm}^3$.

4.4.2 Determinação de I (fator de liberação do mineral, adimensional)

Considerando-se que não é necessária a separação da ganga (partículas que não são de interesse devido à heterogeneidade) tem-se:

Se $d \leq d_0$, $I = 1,00$

Se $d > d_0$, $I = \sqrt{\frac{d_0}{d}}$

I deve estar sempre entre 0,03 e 1,0. Para os valores de $d = 2,5 \text{ cm}$ e de $d_0 = 2,5 \text{ cm}$, chega-se a $I = 1,00$

4.4.3 Determinação de f (fator de forma do mineral, adimensional)

Este fator é considerado constante e igual a 0,5, como para os minérios em geral; logo, emprega-se $f = 0,50$.

4.4.4 Determinação de h (fator de distribuição de tamanho das partículas, adimensional)

Deve-se considerar que os finos foram removidos e utilizando-se a próxima peneira da série, ou seja, material com granulometria compreendida entre duas peneiras sucessivas utilizadas. Para $h = 0,25$ (minérios cominuídos para passar numa abertura de peneira) e $h = 0,50$ (minérios com granulometria compreendida entre duas peneiras sucessivas da série), adota-se $h = 0,50$.

4.4.5 Equação geral da teoria de Pierre Gy

Foi considerado 106.000 kg de pedra (W) reciclada como sendo a quantidade necessária para a produção e aplicação de 150 m³ de CCR numa jornada de trabalho de uma obra de pavimentação (707 kg/m³). Para efeito de cálculo, como tem-se uma massa de material amostrado (W) grande, pode-se considerar a razão 1/W tendendo a zero conforme visto no item 2.4, simplificando a equação para:

$$w = \frac{d^3 \cdot Q \cdot l \cdot f \cdot h}{S_a^2} \quad [4.2]$$

Para os valores $d = 2,5$ cm e $S_a = 0,030$ chega-se, portanto, a $w = 534.765,6$ g.

Segundo a teoria de Pierre Gy, a amostra mínima produzida (w) de cada lote (W) na usina, deveria ser de 535 kg. Neste trabalho foram adotadas amostras de 600 kg atendendo plenamente a este procedimento.

Apesar da quantidade menor de pedrisco (404 kg/m³), foram coletadas amostras de mesmo tamanho.

4.5 Separação densitária dos agregados reciclados graúdos de RCD

Para este estudo, o equipamento utilizado foi o cone de separação densitária *Sink and Float* (Figura 4.12). Este trabalho foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da USP - Universidade de São Paulo. A polpa do meio denso foi obtida com a mistura de ferro-silício 75% (ferro 75% e silício 25%) e misturada com água até atingir-se a densidade de 2,2 recomendada por Angulo (2005) para estudo de concretos.

Figura 4.12 – Equipamento *Sink and Float*

A quantidade em massa de agregado reciclado (brita 0 e brita) de cada lote a ser utilizada, foi definida baseada num traço piloto de CCR para 110 kg/m^3 de cimento conforme Figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17.

Umidade do concreto (H%)	6,00	
Teor de argamassa (%)	45,00	
Relação água/cimento	1,20	
Agregado (m)	19,020	
Consumo de cimento(kg/m ³)	110	
Areia (kg)	42%	8,000
Brita 0 (kg)	24%	4,560
Brita (kg)	34%	6,460
TOTAL	100%	19,020

Figura 4.13 – Lote 1- Dosagem de CCR com Agregados Reciclados

Umidade do concreto (H%)		6,00
Teor de argamassa (%)		45,00
Relação água/cimento		1,19
Agregado (m)		18,833
Consumo de cimento(kg/m ³)		110
Areia (kg)	42%	7,925
Brita 0 (kg)	8%	1,507
Brita (kg)	50%	9,417
TOTAL	100%	18,848

Figura 4.14 – Lote 2 - Dosagem de CCR com Agregados Reciclados

Umidade do concreto (H%)		6,00
Teor de argamassa (%)		45,00
Relação água/cimento		1,18
Agregado (m)		18,667
Consumo de cimento(kg/m³)		110
Areia (kg)	42%	7,850
Brita 0 (kg)	20%	3,733
Brita (kg)	38%	7,093
TOTAL	100%	18,677

Figura 4.15 – Lote 3 - Dosagem de CCR com Agregados Reciclados

Umidade do concreto (H%)		6,00
Teor de argamassa (%)		45,00
Relação água/cimento		1,15
Agregado (m)		18,167
Consumo de cimento(kg/m ³)		110
Areia (kg)	42%	7,625
Brita 0 (kg)	17%	3,088
Brita (kg)	41%	7,448
TOTAL	100%	18,162

Figura 4.16 – Lote 4 - Dosagem de CCR com Agregados Reciclados

Figura 4.17 – Lote 5 - Dosagem de CCR com Agregados Reciclados

Outro cuidado foi eliminar da composição resultante dos agregados reciclados, a fração passante na peneira 4,8 mm. Não é recomendada a utilização deste material no ensaio realizado no *sink and float* pois este em contato com a polpa pode alterar a sua densidade de 2,2 g/cm³ de uma forma tal que prejudique os resultados obtidos. Outro fator é que a eficiência de separação decresce com a diminuição de tamanho das partículas, devido a uma baixa velocidade de sedimentação destas (Luz, 2004). Antes da execução do ensaio, todos os lotes foram peneirados e utilizados apenas o material retido na peneira 4,8mm.

Durante o ensaio, periodicamente, foi realizado controle da densidade da polpa. A circulação da polpa pelos cones garantia a sua não sedimentação. Como segurança do sistema, a polpa situada na parte inferior do sistema era recirculada através de uma torneira, destinada para este fim, no equipamento.

Os agregados graúdos de RCD reciclados foram lançados, lentamente e de maneira uniforme, na superfície da polpa livre de partículas, do cone superior do equipamento (Figura 4.18). O cesto contido nesse cilindro maior reteve as partículas afundadas enquanto o fluxo da polpa transportava as flutuadas para o cone inferior, sendo retidas pelo cesto do cilindro menor, concluindo a separação. Os materiais foram retirados separadamente e lavados para eliminação dos resíduos de ferro-silício (Figura 4.19)

Figura 4.18 – Lançamento lento e uniforme dos Agregados Reciclados

Das cinco amostras, foram selecionadas três: a que apresentou a maior densidade, aquela de menor densidade e uma amostra de densidade intermediária. Estas amostras seriam dosadas para o CCR e suas propriedades mecânicas comparadas com o CCR dosado com agregado natural.

Figura 4.19 - Eliminação dos resíduos de ferro-silício da amostra

A Tabela 4.2 apresenta a massa retida na peneira 4,8 mm de cada lote, que foi utilizada no ensaio.

Tabela 4.2: Massa retida na peneira 4,8mm

A.R. para o Sink and Float			
Amostras	Massa total (kg)	Passa # 4,8mm(kg)	Retida # 4,8mm (Kg)
1	48,80	6,20	42,60
2	44,22	3,62	40,60
3	36,00	6,28	29,72
4	35,05	7,12	27,93
5	35,43	12,67	22,76

A Tabela 4.3 apresenta o resultado da separação densitária. De acordo com o exposto, foram selecionados os lotes 1 (mais denso); 3 (densidade intermediária) e 4 (menos denso) para o estudo das propriedades mecânicas. Os lotes 2 e 5 foram abandonados. A Figura 4.20 apresenta os materiais de cada lote que afundaram, ou seja, a porcentagem do material com densidade superior a 2,2 g/cm³

Tabela 4.3: amostras escolhidas: 1; 3 e 4

Resultados - Sink and Float – densidade > 2,2 g/cm³			
Amostras/Origem	Flutua (kg)	Afunda(kg)	Total (kg)
1 – Pavimento de concreto	9,80	31,68	41,48
	23,63%	76,37%	100,00%
2 – Posto de gasolina	13,46	30,16	43,62
	30,86%	69,14%	100,00%
3 - Mixto	9,84	19,30	29,14
	33,77%	66,23%	100,00%
4 - Mixto	15,70	11,30	27,00
	58,15%	41,85%	100,00%
5 - Mixto	10,70	11,76	22,46
	47,64%	52,36%	100,00%

Lote 1

Lote 2

Lote 3

Lote 4

Lote 5

Figura 4.20: Materiais que afundaram no cilindro superior do Sink and Float

4.6 Cimento Portland

O cimento utilizado neste trabalho foi o cimento BARROSO CP III 40 RS, fabricado pela Holcim atendendo à especificação brasileira ABNT / NBR 5737 – Cimento Portland Resistente a Sulfatos – CP RS. Este tipo de cimento foi escolhido por ser um produto com boa disponibilidade principalmente na região sudeste do Brasil.

São apresentados os resultados das características químicas (Tabela 4.4) e físicas (Tabela 4.5) do cimento utilizado, obtidas nos ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. A densidade do cimento verificada em laboratório foi de 2,98.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de caracterização química do cimento

Cimento	Ensaio Químico em Porcentagem												
	CO ₂	PF	R.I.	SO ₃	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	S	Total
CP III 40 RS	2,32	2,97	1,31	2,06	2,75	25,64	7,07	1,75	51,96	0,19	0,56	1,36	99,94

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de caracterização física do cimento

Cimento	Ensaio Físico							
	# 200 (%)	Blaine (cm ² /g)	Tempos de pega (min)		Exp. Quente (mm)	Resistência à Compressão (MPa)		
			Início	Fim		3 dias	7 dias	28 dias
CP III 40 RS	0,2	4370	286	376	0,5	25,6	37,6	48

4.7 Agregados naturais britados

Para este trabalho, no CCR produzido com agregados naturais britados, foram utilizados quatro tipos de agregados: areia artificial como agregado miúdo, brita zero (pedrisco), brita 1 e brita 2 como agregado graúdo. Todos os materiais têm origem granítica e os materiais foram fornecidos pela Pedreira de Perus da Embu S/A. Todos os ensaios de caracterização dos materiais e de comportamento mecânico do CCR foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Concreto da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

Na Tabela 4.6 são apresentadas as principais características físicas dos agregados naturais britados. Nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, são apresentadas suas respectivas curvas granulométricas.

Figura 4.21 - Curva granulométrica da areia

Figura 4.22 - Curva granulométrica da brita zero

Figura 4.23 - Curva granulométrica da brita 1

Figura 4.24 - Curva granulométrica da brita 2

Tabela 4.6 - Índices físicos dos agregados naturais britados utilizados

Agregados	Areia	Brita 0	Brita 1	Brita 2
Dimensão Máxima (mm)	6,3	9,5	25	31,5
Módulo de Finura	3,01	5,63	6,91	7,86
Densidade dos grãos (g/cm³)	2,61	2,65	2,65	2,69
Massa Unitária (kg/dm³)	1,75	1,47	1,48	1,47
Material Pulverulento (%)	17,9	0,7	0,8	0,4
Absorção (%)	1,26	1,33	0,9	0,6

4.8 Água

A água utilizada para a realização dos ensaios foi a servida pela SABESP no abastecimento da cidade de São Paulo.

4.9 Agregados reciclados

A idéia inicial era utilizar 100% de brita 0 e brita reciclada, mas o material visualmente apresentou uma grande quantidade de finos. Para verificar a real situação dos materiais, foi coletada uma amostra representativa de cada material e verificada a porcentagem retida na peneira 4,8mm para a brita zero (pedrisco) e para a brita. Os resultados referentes aos três lotes selecionados são apresentados nos tabelas 4.7, 4.8 e 4.9.

Tabela 4.7 – Porcentagem de material retida na peneira 4,8 mm Amostra 1

Agregado	Reciclado - amostra 1	
Brita	kg	%
Massa total da amostra	9,580	100,00
Massa retida na # 4,8 mm	9,120	95,20
Massa passante na #4,8 mm	0,460	4,80
Brita 0	kg	%
Massa total da amostra	9,400	100,00
Massa retida na # 4,8 mm	7,040	74,89
Massa passante na #4,8 mm	2,360	25,11

Tabela 4.8 – Porcentagem de material retido na peneira 4,8 mm Amostra 3

Agregado	Reciclado - amostra 3	
Brita	kg	%
Massa total da amostra	9,440	100,00
Massa retida na # 4,8 mm	8,800	93,22
Massa passante na #4,8 mm	0,640	6,78
Brita 0	kg	%
Massa total da amostra	9,440	100,00
Massa retida na # 4,8 mm	8,800	47,47
Massa passante na #4,8 mm	0,640	52,53

Tabela 4.9 – Porcentagem de material retido na peneira 4,8 mm Amostra 4

Agregado	Reciclado - amostra 4	
Brita	kg	%
Massa total da amostra	9,660	100,00
Massa retida na # 4,8 mm	9,360	96,89
Massa passante na #4,8 mm	0,300	3,11
Brita 0	kg	%
Massa total da amostra	9,660	100,00
Massa retida na # 4,8 mm	9,360	37,55
Massa passante na #4,8 mm	0,300	62,45

Os resultados obtidos em laboratório confirmaram as suspeitas visuais iniciais. Foi adotado para as dosagens do CCR com agregados reciclados que a brita zero seria uma mistura de reciclado e natural na razão de 50%, devido o excesso de material passante na peneira 4,8 mm. Em virtude disso, foi necessária uma correção na dosagem onde foi também compensada a fração areia do traço inicial. A brita foi mantida 100% reciclada.

Foi adotado também que, para efeito de estudo, uma dosagem de CCR com 100% de brita zero reciclada seria produzida. Para este caso, foi escolhida a amostra 4 por apresentar uma composição maior de agregados de origem cerâmica, apresentando maior absorção. Neste trabalho, o CCR produzido com esta dosagem foi chamado de CCR4-100%. Todos materiais reciclados foram coletados na usina Urbem Tecnologia Ambiental Ltda, em São Bernardo do Campo - SP.

A usina onde foram coletadas as amostras não produz brita 1 e brita 2 separadamente. Neste trabalho, foi chamado simplesmente por brita, a substituição da brita 1 e brita 2 naturais por este material, fazendo-se as correções necessárias na dosagem.

Na sequência são apresentadas as respectivas curvas granulométricas da amostra 1 (Figura 4.25), amostra 2 (Figura 4.26), amostra 3 (Figura 4.27), amostra 4 (Figura 4.28) e amostra 5 (Figura 4.29) e suas principais características físicas (Tabela 4.10). Também são apresentadas as granulometrias da brita 0 reciclada com 50% de agregado natural para as amostras selecionadas (Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32). Os lotes selecionados foram os lotes 1, 3 e 4.

Figura 4.25 - Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 1

Figura 4.26 - Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 2

Figura 4.27 - Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 3

Figura 4.28 - Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 4

Figura 4.29 - Curvas granulométricas da brita e brita 0 – Amostra 5

Tabela 4.10 – Principais características físicas dos agregados reciclados

Lotes	Reciclado 1		Reciclado 2		Reciclado 3		Reciclado 4		Reciclado 5	
Agregados	Brita	Brita 0	Brita	Brita 0	Brita	Brita 0	Brita	Brita 0	Brita	Brita 0
Dimensão Máxima (mm)	25,00	9,50	25,00	9,50	25,00	9,50	25,00	9,50	25,00	9,50
Módulo de Finura	7,24	5,50	6,95	5,35	7,22	5,09	7,06	4,67	7,38	3,75
Densidade dos grãos	2,54	2,45	2,46	2,42	2,43	2,35	2,29	2,29	2,36	2,31
Absorção (%)	4,60	5,90	6,40	7,30	6,00	8,70	9,50	10,60	7,90	9,20
Massa unitária solta (g/cm³)	1,34	1,21			1,25	1,26	1,20	1,29

Figura 4.30 - Curva granulométrica da brita 0 reciclada e natural na razão de 50% - Amostra 1

Figura 4.31 - Curva granulométrica da brita 0 reciclada e natural na razão de 50% - Amostra 3

Figura 4.32 - Curva granulométrica da brita 0 reciclada e natural na razão de 50% - Amostra 4

4.10 Dosagem do CCR

As dosagens obedeceram a parâmetros apresentados resumidamente no item 4. Este trabalho seguiu os princípios apresentados por Abreu (2002) e o DNER (1992).

Inicialmente, foi definida a curva granulométrica do agregado total do CCR a ser dosado e que melhor se aproxime das curvas granulométricas adotadas de acordo com a Figura 4.1. A seguir, foi calculada a massa específica total do agregado, ponderando-se as massas específicas individuais das frações dos agregados utilizados.

Após a escolha do consumo de cimento (C) a ser utilizado no traço experimental, calculou-se para diferentes valores de umidade (h) dentro do intervalo sugerido pela literatura, ou seja, entre 4% e 7% (DNER, 1992) com incrementos de 0,5%. Para os agregados reciclados, devido ao alto teor de absorção, este intervalo é maior de acordo com o tipo de agregado reciclado utilizado. Como mostrado na Figura 4.33, este intervalo chegou a 12%. Todos os tipos de agregados, sejam naturais ou reciclados, foram previamente secados em estufa para posterior execução das dosagens (Figura 4.34).

Figura 4.33: CCR com agregado reciclado amostra 4 com umidade 12%

Figura 4.34: Agregados naturais e reciclados após secagem em estufa

Para facilitar as dosagens durante o trabalho experimental, foi utilizada uma planilha eletrônica de cálculo para as diferentes quantidades de agregados, consumos de cimento e teores de umidade para confecção das curvas de compactações. Esta planilha também foi utilizada para o cálculo dos traços unitários para as moldagens definitivas após obtenção dos teores ótimos de umidade para cada CCR avaliado. A planilha também fornece as quantidades suficientes de materiais constituintes do CCR, para produção do traço experimental em laboratório para um dado volume de CCR produzido.

Mantido constante o consumo de cimento arbitrado, variando-se o teor de umidade (h), determina-se a massa específica seca de corpos-de-prova moldados na energia normal. Os pares de resultados, num mínimo de 5, foram locados em coordenadas cartesianas a fim de poder traçar a curva correspondente onde obtém-se a massa específica aparente seca máxima que corresponde à umidade ótima.

Para o CCR com agregados naturais britados, a umidade ótima obtida foi 6%. Na moldagem dos corpos-de-prova do CCR com agregados reciclados na umidade ótima obtida, durante a aplicação da energia de compactação

necessária, ocorreu exsudação de água. Para evitar esta situação, foi adotado uma redução de 1,0% de umidade em relação à umidade ótima, para cada CCR dosado com os agregados reciclados das amostras 1, 3, 4 e 4 (100%). A umidade resultante para o CCR com agregados reciclados da amostra 1 foi 8,4% (Figura 4.35), para a amostra 3 de 8,8% (Figura 4.36), para a amostra 4, de 8,9% (Figura 4.37) e para a amostra 4 - 100%, de 10% (Figura 4.38).

Definidas as amostras adotou-se a seguinte nomenclatura para os CCR estudados:

- CCR*: mistura com agregados naturais britados (mistura de referência);
- CCR1: mistura com agregados reciclados (100% de brita e 50% de brita 0) de RCD da amostra 1 (mais denso);
- CCR3: mistura com agregados reciclados (100% de brita e 50% de brita 0) de RCD da amostra 3 (densidade intermediária);
- CCR4: mistura com agregados reciclados (100% de brita e 50% de brita 0) de RCD da amostra 4 (menos denso);
- CCR4 - 100%: mistura com agregados reciclados (100% de brita e 100% de brita 0) de RCD da amostra 4.

Figura 4.35: CCR1 com umidade 8,4%

Figura 4.36: CCR3 com umidade 8,8%

Figura 4.37: CCR4 com umidade 8,9%

Figura 4.38: CCR4 - 100% com umidade 10%

Abaixo de cada curva de compactação, são apresentados os resultados de granulometria, dosagem e traço de acordo com as unidades adotadas e o consumo de cimento (Tabelas 4.11 a 4.25)

Para o CCR* com consumo de cimento de 90 kg/m^3 , são apresentadas a curva de compactação Figura (4.39), a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.11) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.40).

Figura 4.39: Curva de compactação para o CCR* com consumo de cimento 90 kg/m^3

Tabela 4.11: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR* com consumo de cimento de 90kg/m³ e principais características físicas

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0 90875	Brita 1 90876	Brita 2 90877	Areia 43%	Brita 0 25%	Brita 1 22%	Brita 2 10%	Mistura
1	25			0	13	0,0	0,0	0,0	1,3	1,3
3/4"	19		0	8	86	0,0	0,0	1,8	8,6	10,4
1 / 2 "	12,5		0	62	100	0,0	0,0	13,6	10,0	23,6
3 / 8 "	9,5	0	0	89	100	0,0	0,0	19,6	10,0	29,6
1 / 4 "	6,3	4	33	99	100	1,7	8,3	21,8	10,0	41,7
4	4,8	12	72	99	100	5,1	18,0	21,8	10,0	54,9
9	2,4	32	96	99	100	13,7	24,0	21,8	10,0	69,5
16	1,2	49	98	99	100	20,9	24,5	21,8	10,0	77,2
30	0,6	61	99	99	100	26,1	24,8	21,8	10,0	82,6
50	0,3	70	99	99	100	29,9	24,8	21,8	10,0	86,4
100	0,15	77	99	99	100	32,9	24,8	21,8	10,0	89,4
Fundo	< 0,15	100	100	100	100	42,7	25,0	22,0	10,0	99,7
Total		301	563	691	786					500
Relação (%)		43%	25%	22%	10%	100%				
Mód. de finura		3,01	5,63	6,91	7,86					5,00
Massa Específica		2,61	2,65	2,65	2,69					

	Matéria Prima					
	Cimen to	Areia	Brita 0	Brita 1	Brita 2	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,47	1,48	1,47	
massa esp. (kg/L)	2,98	2,61	2,65	2,65	2,69	
traço	1,000	10,325	6,042	5,317	2,417	1,51
kg/m3	90	930	544	479	218	136
40	3,641	37,593	21,998	19,358	8,799	5,498

Massa específica do concreto (t/m³)	2,422
Umidade do concreto (%)	6,00
Teor de argamassa (%)	45,00
Relação água/cimento	1,51
Agregado	24,167
Consumo de cimento (kg/m³)	90
Areia (kg)	43% 10,325
Brita 0 (kg)	25% 6,042
Brita 1 (kg)	22% 5,317
Brita 2 (kg)	10% 2,417
TOTAL	100% 24,100

Figura 4.40: Curva granulométrica obtida para o CCR* com consumo de cimento de 90 kg/m³

Para o CCR* com consumo de cimento de 110 kg/m^3 , é apresentada a curva de compactação Figura (4.41), a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.12) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.42).

Figura 4.41: Curva de compactação para o CCR* com consumo de cimento de 110 kg/m^3

Tabela 4.12: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR* com consumo de cimento de 110 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0 90875	Brita 1 90876	Brita 2 90877	Areia 42%	Brita 0 26%	Brita 1 22%	Brita 2 10%	Mistura
1	25			0	13	0,0	0,0	0,0	1,3	1,3
3/4"	19		0	8	86	0,0	0,0	1,8	8,6	10,4
1 / 2 "	12,5		0	62	100	0,0	0,0	13,6	10,0	23,6
3 / 8 "	9,5	0	0	89	100	0,0	0,0	19,6	10,0	29,6
1 / 4 "	6,3	4	33	99	100	1,7	8,6	21,8	10,0	42,0
4	4,8	12	72	99	100	5,1	18,7	21,8	10,0	55,6
9	2,4	32	96	99	100	13,5	25,0	21,8	10,0	70,2
16	1,2	49	98	99	100	20,7	25,5	21,8	10,0	77,9
30	0,6	61	99	99	100	25,7	25,7	21,8	10,0	83,2
50	0,3	70	99	99	100	29,5	25,7	21,8	10,0	87,0
100	0,15	77	99	99	100	32,5	25,7	21,8	10,0	90,0
Fundo	< 0,15	100	100	100	100	42,2	26,0	22,0	10,0	100,2
Total		301	563	691	786					504
Relação(%)		42%	26%	22%	10%	100%				
Mód. de finura		3,01	5,63	6,91	7,86					5,04
Massa Específica		2,61	2,65	2,65	2,69					

	Matéria Prima					
	Cimen to	Areia	Brita 0	Brita 1	Brita 2	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,47	1,48	1,47	
massa esp. (kg/L)	2,98	2,61	2,65	2,65	2,69	
traço	1,000	8,225	5,070	4,290	1,950	1,23
kg/m3	110	907	559	473	215	136
40	4,457	36,662	22,599	19,122	8,692	5,483

Massa específica do concreto (t/m³)	2,425
Umidade do concreto (%)	6,00
Teor de argamassa (%)	45,00
Relação água/cimento	1,23
Agregado	19,500
Consumo de cimento (kg/m³)	110
Areia (kg)	42% 8,225
Brita 0 (kg)	26% 5,070
Brita 1 (kg)	22% 4,290
Brita 2 (kg)	10% 1,950
TOTAL	100% 19,535

Figura 4.42: Curva granulométrica obtida para o CCR* com consumo de cimento de 110 kg/m³

Para o CCR* com consumo de cimento de 130 kg/m^3 , é apresentada a curva de compactação (Figura 4.43), a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.13) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.44).

Figura 4.43: Curva de compactação para CCR* com consumo de cimento de 130 kg/m^3

Tabela 4.13: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR* com consumo de cimento de 130kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0 90875	Brita 1 90876	Brita 2 90877	Areia 42%	Brita 0 26%	Brita 1 22%	Brita 2 10%	Mistura
1	25			0	13	0,0	0,0	0,0	1,3	1,3
¾"	19		0	8	86	0,0	0,0	1,8	8,6	10,4
1 / 2 "	12,5		0	62	100	0,0	0,0	13,6	10,0	23,6
3 / 8 "	9,5	0	0	89	100	0,0	0,0	19,6	10,0	29,6
1 / 4 "	6,3	4	33	99	100	1,7	8,6	21,8	10,0	42,0
4	4,8	12	72	99	100	5,0	18,7	21,8	10,0	55,5
9	2,4	32	96	99	100	13,3	25,0	21,8	10,0	70,1
16	1,2	49	98	99	100	20,4	25,5	21,8	10,0	77,7
30	0,6	61	99	99	100	25,4	25,7	21,8	10,0	82,9
50	0,3	70	99	99	100	29,2	25,7	21,8	10,0	86,7
100	0,15	77	99	99	100	32,1	25,7	21,8	10,0	89,6
Fundo	< 0,15	100	100	100	100	41,7	26,0	22,0	10,0	99,7
Total		301	563	691	786					502
Relação (%)		42%	26%	22%	10%	100%				
Mód. de finura		3,01	5,63	6,91	7,86					5,02
Massa Específica		2,61	2,65	2,65	2,69					

	Matéria Prima					
	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Brita 2	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,47	1,48	1,47	
massa esp. (kg/L)	2,98	2,61	2,65	2,65	2,69	
traço	1,000	6,875	4,290	3,630	1,650	1,05
kg/m3	130	893	557	472	214	136
40	5,248	36,081	22,515	19,051	8,659	5,511

Massa específica do concreto (t/m³)		2,427
Umidade do concreto (%)		6,00
Teor de argamassa (%)		45,00
Relação água/cimento		1,05
Agregado		16,500
Consumo de cimento (kg/m³)		130
Areia (kg)	42%	6,875
Brita 0 (kg)	26%	4,290
Brita 1 (kg)	22%	3,630
Brita 2 (kg)	10%	1,650
TOTAL		16,445

Figura 4.44 Curva granulométrica obtida para o CCR* com consumo de cimento de 130 kg/m³

Para o CCR com utilização de agregados reciclados, o estudo foi realizado para consumos de cimento variando de 110 kg/m³ a 150 kg/m³, para cada tipo de amostra e sua respectiva umidade adotada. A umidade desejada obtida através da curva de compactação para o CCR com consumo de 110 kg/m³, foi adotada para os demais consumos estudados. Para o CCR1 com consumo de cimento de 110 kg/m³, são apresentadas a curva de compactação (Figura 4.45), a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.14) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.46).

Figura 4.45: Curva de compactação para o CCR1 com consumo de cimento de 110 kg/m³

Tabela 4.14: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR1 com consumo de cimento de 110 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 36%	Brita 0 31%	Brita 33%	Mistura
1	25			3	0,0	0,0	1,0	1,0
3/4"	19		0	31	0,0	0,0	10,2	10,2
1 / 2 "	12,5		0	75	0,0	0,0	24,8	24,8
3 / 8 "	9,5	0	3	93	0,0	0,9	30,7	31,6
1 / 4 "	6,3	4	36	100	1,4	11,2	33,0	45,6
4	4,8	12	70	100	4,3	21,7	33,0	59,0
9	2,4	32	97	100	11,4	30,1	33,0	74,5
16	1,2	49	99	100	17,5	30,7	33,0	81,2
30	0,6	61	99	100	21,7	30,7	33,0	85,4
50	0,3	70	99	100	24,9	30,7	33,0	88,6
100	0,15	77	99	100	27,4	30,7	33,0	91,1
Fundo	< 0,15	100	100	100	35,6	31,0	33,0	99,6
Total		301	566	724				522
Relação (%)		36%	31%	33%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,66	7,24				5,22
Massa Específica		2,61	2,55	2,54				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	Brita 0	Brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,39	1,34	
massa esp. (kg/L)	2,98	2,61	2,55	2,54	
traço	1,000	6,475	5,632	5,995	1,61
kg/m3	110	713	620	660	177
14	1,556	10,078	8,765	9,331	2,506

Massa específica do concreto (t/m³)	2,303
Umidade do concreto (%)	8,40
Teor de argamassa (%)	39,00
Relação água/cimento	1,61
Agregado	18,167
Consumo de cimento (kg/m³)	110
Areia (kg)	36% 6,475
Brita 0 (kg)	31% 5,632
Brita (kg)	33% 5,995
TOTAL	100% 18,102

Figura 4.46: Curva granulométrica obtida para o CCR1 com consumo de cimento de 110 kg/m³

Para o CCR1 com consumo de cimento de 130 kg/m³, é apresentada a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.15) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.47).

Tabela 4.15: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR1 com consumo de cimento de 130 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 35%	Brita 0 31%	Brita 34%	Mistura
1	25			3	0,0	0,0	1,0	1,0
3/4"	19		0	31	0,0	0,0	10,5	10,5
1 / 2 "	12,5		0	75	0,0	0,0	25,5	25,5
3 / 8 "	9,5	0	3	93	0,0	0,9	31,6	32,6
1 / 4 "	6,3	4	36	100	1,4	11,2	34,0	46,6
4	4,8	12	70	100	4,2	21,7	34,0	59,9
9	2,4	32	97	100	11,2	30,1	34,0	75,3
16	1,2	49	99	100	17,1	30,7	34,0	81,8
30	0,6	61	99	100	21,3	30,7	34,0	86,0
50	0,3	70	99	100	24,5	30,7	34,0	89,2
100	0,15	77	99	100	26,9	30,7	34,0	91,6
Fundo	< 0,15	100	100	100	35,0	31,0	34,0	100,0
Total		301	566	724				527
Relação (%)		35%	31%	34%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,66	7,24				5,27
Massa Específica		2,61	2,55	2,54				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	Brita 0	Brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,39	1,34	
massa esp. (kg/L)	2,98	2,61	2,55	2,54	
traço	1,000	5,314	4,709	5,165	1,36
kg/m ³	130	691	612	672	177
14	1,839	9,774	8,661	9,499	2,501

Massa específica do concreto (t/m³)		2,305
Umidade do concreto (%)		8,40
Teor de argamassa (%)		39,00
Relação água/cimento		1,36
Agregado		15,190
Consumo de cimento (kg/m³)		130
Areia (kg)	35%	5,314
Brita 0 (kg)	31%	4,709
Brita (kg)	34%	5,165
TOTAL	100%	15,188

Figura 4.47: Curva granulométrica obtida para o CCR1 com consumo de cimento de 130 kg/m³

Para o CCR1 com consumo de cimento de 150 kg/m^3 , é apresentada a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.16) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.48).

Tabela 4.16: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR1 com consumo de cimento de 150 kg/m^3 e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 34%	Brita 0 32%	Brita 34%	Mistura
1	25			3	0,0	0,0	1,0	1,0
3/4"	19		0	31	0,0	0,0	10,5	10,5
1 / 2 "	12,5		0	75	0,0	0,0	25,5	25,5
3 / 8 "	9,5	0	3	93	0,0	1,0	31,6	32,6
1 / 4 "	6,3	4	36	100	1,4	11,5	34,0	46,9
4	4,8	12	70	100	4,1	22,4	34,0	60,5
9	2,4	32	97	100	11,0	31,0	34,0	76,0
16	1,2	49	99	100	16,8	31,7	34,0	82,5
30	0,6	61	99	100	20,9	31,7	34,0	86,6
50	0,3	70	99	100	24,0	31,7	34,0	89,7
100	0,15	77	99	100	26,4	31,7	34,0	92,1
Fundo	< 0,15	100	100	100	34,3	32,0	34,0	100,3
Total		301	566	724				531
Relação (%)		34%	32%	34%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,66	7,24				5,31
Massa Específica		2,61	2,55	2,54				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	Brita 0	Brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,39	1,34	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,55	2,54	
traço	1,000	4,479	4,175	4,436	1,18
kg/m ³	150	670	625	664	177
14	2,116	9,478	8,836	9,388	2,497

Massa específica do concreto (t/m³)		2,308
Umidade do concreto (%)		8,40
Teor de argamassa (%)		39,00
Relação água/cimento		1,18
Agregado		13,048
Consumo de cimento (kg/m³)		150
Areia (kg)	34%	4,479
Brita 0 (kg)	32%	4,175
Brita (kg)	34%	4,436
TOTAL	100%	13,090

Figura 4.48: Curva granulométrica obtida para o CCR1 com consumo de cimento de 150 kg/m^3

Para o CCR3 com consumo de cimento de 110 kg/m³, são apresentadas a curva de compactação Figura (4.49), a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (tabela 4.17) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.50).

Figura 4.49: Curva de compactação para o CCR3 com consumo de cimento de 110 kg/m³

Tabela 4.17: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR3 com consumo de cimento de 110 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia	Brita 0	Brita	Areia	Brita 0	Brita	Mistura
		90874			36%	32%	32%	
1	25			1	0,0	0,0	0,3	0,3
3/4"	19		0	28	0,0	0,0	9,0	9,0
1 / 2 "	12,5		0	76	0,0	0,0	24,3	24,3
3 / 8 "	9,5	0	2	94	0,0	0,6	30,1	30,7
1 / 4 "	6,3	4	31	100	1,4	9,9	32,0	43,3
4	4,8	12	64	100	4,3	20,5	32,0	56,7
9	2,4	32	94	100	11,4	30,1	32,0	73,5
16	1,2	49	97	100	17,4	31,0	32,0	80,5
30	0,6	61	98	100	21,7	31,4	32,0	85,1
50	0,3	70	99	100	24,9	31,7	32,0	88,6
100	0,15	77	100	100	27,4	32,0	32,0	91,4
Fundo	< 0,15	100	100	100	35,6	32,0	32,0	99,6
Total		301	554	722				515
Relação (%)		36%	32%	32%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,54	7,22				5,15
Massa Específica		2,61	2,50	2,43				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	Brita 0	Brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,43	1,25	
massa esp. (kg/L)	2,98	2,61	2,50	2,43	
traço	1,000	6,313	5,680	5,680	1,65
kg/m3	110	693	624	624	181
14	1,553	9,805	8,822	8,822	2,563

Massa específica do concreto (t/m³)	2,255
Umidade do concreto (%)	8,80
Teor de argamassa (%)	39,00
Relação água/cimento	1,65
Agregado	17,750
Consumo de cimento (kg/m³)	110
Areia (kg)	36% 6,313
Brita 0 (kg)	32% 5,680
Brita (kg)	32% 5,680
TOTAL	100% 17,673

Figura 4.50: Curva granulométrica obtida para o CCR3 com consumo de cimento de 110 kg/m³

Para o CCR3 com consumo de cimento de 130 kg/m³, é apresentada a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.18) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.51).

Tabela 4.18: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR3 com consumo de cimento de 130 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 35%	Brita 0 32%	Brita 33%	Mistura
1	25			1	0,0	0,0	0,3	0,3
3/4"	19		0	28	0,0	0,0	9,2	9,2
1 / 2 "	12,5		0	76	0,0	0,0	25,1	25,1
3 / 8 "	9,5	0	2	94	0,0	0,6	31,0	31,7
1 / 4 "	6,3	4	31	100	1,4	9,9	33,0	44,3
4	4,8	12	64	100	4,2	20,5	33,0	57,7
9	2,4	32	94	100	11,2	30,1	33,0	74,2
16	1,2	49	97	100	17,1	31,0	33,0	81,1
30	0,6	61	98	100	21,3	31,4	33,0	85,6
50	0,3	70	99	100	24,4	31,7	33,0	89,1
100	0,15	77	100	100	26,9	32,0	33,0	91,9
Fundo	< 0,15	100	100	100	34,9	32,0	33,0	99,9
Total		301	554	722				521
Relação (%)		35%	32%	33%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,54	7,22				5,21
Massa Específica		2,61	2,50	2,43				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	Brita 0	Brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,43	1,25	
massa esp. (kg/L)	2,98	2,61	2,50	2,43	
traço	1,000	5,160	4,735	4,883	1,39
kg/m3	130	672	616	636	181
14	1,841	9,498	8,715	8,987	2,559

Massa específica do concreto (t/m ³)	2,257
Umidade do concreto (%)	8,80
Teor de argamassa (%)	39,00
Relação água/cimento	1,39
Agregado	14,795
Consumo de cimento (kg/m ³)	130
Areia (kg)	35% 5,160
Brita 0 (kg)	32% 4,735
Brita (kg)	33% 4,883
TOTAL	100% 14,777

Figura 4.51: Curva granulométrica obtida para o CCR3 com consumo de cimento de 130 kg/m³

Para o CCR3 com consumo de cimento de 150 kg/m³, é apresentada a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.19) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.52).

Tabela 4.19: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR3 com consumo de cimento de 150 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 34%	Brita 0 33%	Brita 33%	Mistura
1	25			1	0,0	0,0	0,3	0,3
3/4"	19		0	28	0,0	0,0	9,2	9,2
1 / 2 "	12,5		0	76	0,0	0,0	25,1	25,1
3 / 8 "	9,5	0	2	94	0,0	0,7	31,0	31,7
1 / 4 "	6,3	4	31	100	1,4	10,2	33,0	44,6
4	4,8	12	64	100	4,1	21,1	33,0	58,2
9	2,4	32	94	100	10,9	31,0	33,0	75,0
16	1,2	49	97	100	16,8	32,0	33,0	81,8
30	0,6	61	98	100	20,9	32,3	33,0	86,2
50	0,3	70	99	100	23,9	32,7	33,0	89,6
100	0,15	77	100	100	26,3	33,0	33,0	92,3
Fundo	< 0,15	100	100	100	34,2	33,0	33,0	100,2
Total		301	554	722				524
Relação (%)		34%	33%	33%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,54	7,22				5,24
Massa Específica		2,61	2,50	2,43				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	Brita 0	Brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,43	1,25	
massa esp. (kg/L)	2,98	2,61	2,50	2,43	
traço	1,000	4,340	4,189	4,189	1,21
kg/m3	150	651	628	628	181
14	2,120	9,203	8,881	8,881	2,555

Massa específica do concreto (t/m³)	2,260	
Umidade do concreto (%)	8,80	
Teor de argamassa (%)	39,00	
Relação água/cimento	1,21	
Agregado	12,693	
Consumo de cimento (kg/m³)	150	
Areia (kg)	34%	4,340
Brita 0 (kg)	33%	4,189
Brita (kg)	33%	4,189
TOTAL	100%	12,718

Figura 4.52: Curva granulométrica obtida para o CCR3 com consumo de cimento de 150 kg/m³

Para o CCR4 com consumo de cimento de 110 kg/m^3 , são apresentadas a curva de compactação (Figura 4.53), a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.20) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.54).

Figura 4.53: Curva de compactação para o CCR4 com consumo de cimento de 110 kg/m^3

Tabela 4.20: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 com consumo de cimento de 110 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 35%	Brita 0 31%	Brita 34%	Mistura
1	25			0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	19		0	25	0,0	0,0	8,5	8,5
1 / 2 "	12,5		0	70	0,0	0,0	23,8	23,8
3 / 8 "	9,5	0	1	87	0,0	0,3	29,6	29,9
1 / 4 "	6,3	4	29	98	1,4	9,0	33,3	43,7
4	4,8	12	59	99	4,3	18,3	33,7	56,2
9	2,4	32	85	99	11,3	26,4	33,7	71,4
16	1,2	49	91	99	17,4	28,2	33,7	79,2
30	0,6	61	94	99	21,6	29,1	33,7	84,4
50	0,3	70	96	99	24,8	29,8	33,7	88,2
100	0,15	77	98	99	27,3	30,4	33,7	91,3
Fundo	< 0,15	100	100	100	35,5	31,0	34,0	100,5
Total		301	524	706				509
Relação (%)		35%	31%	34%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,24	7,06				5,09
Massa Específica		2,61	2,47	2,29				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	brita 0	brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,44	1,20	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,47	2,29	
traço	1,000	6,099	5,333	5,849	1,62
kg/m3	110	670	586	643	178
14	1,555	9,482	8,290	9,093	2,519

Massa específica do concreto (t/m³)		2,210
Umidade do concreto (%)		8,90
Teor de argamassa (%)		39,00
Relação água/cimento		1,62
Agregado		17,202
Consumo de cimento (kg/m³)		110
Areia (kg)	35%	6,099
Brita 0 (kg)	31%	5,333
Brita (kg)	34%	5,849
TOTAL	100%	17,280

Figura 4.54: Curva granulométrica obtida para o CCR4 com consumo de cimento de 110 kg/m³

Para o CCR4 com consumo de cimento de 130 kg/m³, a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela T.21) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.55).

Tabela 4.21: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 com consumo de cimento de 130 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 35%	Brita 0 31%	Brita 34%	Mistura
1	25			0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	19		0	25	0,0	0,0	8,5	8,5
1 / 2 "	12,5		0	70	0,0	0,0	23,8	23,8
3 / 8 "	9,5	0	1	87	0,0	0,3	29,6	29,9
1 / 4 "	6,3	4	29	98	1,4	9,0	33,3	43,7
4	4,8	12	59	99	4,2	18,3	33,7	56,1
9	2,4	32	85	99	11,1	26,4	33,7	71,1
16	1,2	49	91	99	17,0	28,2	33,7	78,9
30	0,6	61	94	99	21,2	29,1	33,7	84,0
50	0,3	70	96	99	24,4	29,8	33,7	87,8
100	0,15	77	98	99	26,8	30,4	33,7	90,8
Fundo	< 0,15	100	100	100	34,8	31,0	34,0	99,8
Total		301	524	706				507
Relação (%)		35%	31%	34%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,24	7,06				5,07
Massa Específica		2,61	2,47	2,29				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	brita 0	brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,44	1,20	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,47	2,29	
traço	1,000	5,047	4,497	4,932	1,38
kg/m3	130	655	584	640	179
14	1,836	9,269	8,258	9,057	2,534

Massa específica do concreto (t/m³)	2,211
Umidade do concreto (%)	8,90
Teor de argamassa (%)	39,00
Relação água/cimento	1,38
Agregado	14,506
Consumo de cimento (kg/m³)	130
Areia (kg)	35% 5,047
Brita 0 (kg)	31% 4,497
Brita (kg)	34% 4,932
TOTAL	100% 14,476

Figura 4.55: Curva granulométrica obtida para o CCR4 com consumo de cimento de 130 kg/m³

Para o CCR4 com consumo de cimento de 150 kg/m³, a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.22) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.56).

Tabela 4.22: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 com consumo de cimento de 150 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 34%	Brita 0 32%	Brita 34%	Mistura
1	25			0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	19		0	25	0,0	0,0	8,5	8,5
1 / 2 "	12,5		0	70	0,0	0,0	23,8	23,8
3 / 8 "	9,5	0	1	87	0,0	0,3	29,6	29,9
1 / 4 "	6,3	4	29	98	1,4	9,3	33,3	44,0
4	4,8	12	59	99	4,1	18,9	33,7	56,6
9	2,4	32	85	99	10,9	27,2	33,7	71,8
16	1,2	49	91	99	16,7	29,1	33,7	79,5
30	0,6	61	94	99	20,8	30,1	33,7	84,5
50	0,3	70	96	99	23,8	30,7	33,7	88,2
100	0,15	77	98	99	26,2	31,4	33,7	91,3
Fundo	< 0,15	100	100	100	34,1	32,0	34,0	100,1
Total		301	524	706				510
Relação (%)		34%	32%	34%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,24	7,06				5,10
Massa Específica		2,61	2,47	2,29				

	Matéria Prima				
	cimento	areia	brita 0	brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,44	1,20	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,47	2,29	
traço	1,000	4,215	3,959	4,206	1,19
kg/m3	150	634	596	633	179
14	2,128	8,968	8,423	8,949	2,532

Massa específica do concreto (t/m ³)	2,214
Umidade do concreto (%)	8,90
Teor de argamassa (%)	39,00
Relação água/cimento	1,19
Agregado	12,371
Consumo de cimento (kg/m ³)	150
Areia (kg)	34% 4,215
Brita 0 (kg)	32% 3,959
Brita (kg)	34% 4,206
TOTAL	100% 12,379

Figura 4.56: Curva granulométrica obtida para o CCR4 com consumo de cimento de 150 kg/m³

Para o CCR4 – 100% com consumo de cimento de 110 kg/m³, são apresentadas a curva de compactação (Figura 4.57), a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.23) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.58).

Figura 4.57: Curva de compactação para o CCR4 – 100% com consumo de cimento de 110 kg/m³

Tabela 4.23: Resultados obtidos através da planilha para determinação do traço unitário do CCR4 – 100% com consumo de cimento de 110 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	areia	brita 0	brita	areia	brita 0	brita	Mistura
		90874			31%	36%	33%	
1	25			0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	19		0	25	0,0	0,0	8,3	8,3
1 / 2 "	12,5		0	70	0,0	0,0	23,1	23,1
3 / 8 "	9,5	0	1	87	0,0	0,4	28,7	29,1
1 / 4 "	6,3	4	26	98	1,2	9,4	32,3	42,9
4	4,8	12	46	99	3,7	16,6	32,7	53,0
9	2,4	32	70	99	9,9	25,2	32,7	67,8
16	1,2	49	79	99	15,2	28,4	32,7	76,3
30	0,6	61	85	99	18,9	30,6	32,7	82,2
50	0,3	70	91	99	21,7	32,8	32,7	87,2
100	0,15	77	95	99	23,9	34,2	32,7	90,8
Fundo	< 0,15	100	100	100	31,0	36,0	33,0	100,0
Total		301	467	706				495
Relação (%)		31%	36%	33%	100%			
Mód. de finura		3,01	4,67	7,06				4,95
Massa específica		2,61	2,29	2,29				

Matéria Prima					
	cimento	areia	brita 0	brita	água
massa unit.(kg/l)		1,75	1,29	1,20	
massa esp.(kg/l)	2,98	2,61	2,29	2,29	
traço	1,000	5,090	5,904	5,412	1,74
kg/m3	110	562	652	597	192
16	1,784	9,082	10,534	9,656	3,105

Massa esp. do concreto (t/m)		2,135
Umidade do concreto (%)		10,00
Teor de argamassa (%)		35,00
Relação água/cimento		1,74
Agregado		16,400
Consumo de cimento(kg/m³)		110
areia	31%	5,090
brita 0	36%	5,904
brita 0	33%	5,412
TOTAL	100%	16,406

Figura 4.58: Curva granulométrica para CCR4 – 100% com consumo de cimento de 110 kg/m³

Para o CCR4 – 100% com consumo de cimento de 130 kg/m³, a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.24) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (figura 4.59).

Tabela 4.24: Resultados obtidos através da planilha para determinação do traço unitário do CCR4 – 100% com consumo de cimento de 130 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	areia 90874	brita 0	brita	areia 30%	brita 0 37%	brita 33%	Mistura
1	25			0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	19		0	25	0,0	0,0	8,3	8,3
1 / 2 "	12,5		0	70	0,0	0,0	23,1	23,1
3 / 8 "	9,5	0	1	87	0,0	0,4	28,7	29,1
1 / 4 "	6,3	4	26	98	1,2	9,6	32,3	43,2
4	4,8	12	46	99	3,6	17,0	32,7	53,3
9	2,4	32	70	99	9,7	25,9	32,7	68,3
16	1,2	49	79	99	14,8	29,2	32,7	76,7
30	0,6	61	85	99	18,5	31,5	32,7	82,6
50	0,3	70	91	99	21,2	33,7	32,7	87,5
100	0,15	77	95	99	23,3	35,2	32,7	91,1
Fundo	< 0,15	100	100	100	30,3	37,0	33,0	100,3
Total		301	467	706				497
Relação(%)		30%	37%	33%	100%			
Mód. de finura		3,01	4,67	7,06				4,97
Massa específica		2,61	2,29	2,29				

Matéria Prima					
	cimento	areia	brita 0	brita	água
massa unit.(kg/L)		1,75	1,29	1,20	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,29	2,29	
traço	1,000	4,180	5,106	4,554	1,48
kg/m3	130	542	662	590	192
16	2,095	8,759	10,700	9,543	3,101

Massa específica (t/m ³)	2,137
Umidade do concreto (%)	10,00
Teor de argamassa (%)	35,00
Relação água/cimento	1,48
Agregado	13,800
Consumo de cimento(kg/m ³)	130
areia	30%
brita 0	37%
brita 0	33%
TOTAL	100%
	13,840

Figura 4.59: Curva granulométrica para CCR4 – 100% com consumo de cimento de 130 kg/m³

Para o CCR4 – 100% com consumo de cimento de 150 kg/m³, a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 4.25) e a curva granulométrica obtida em relação à faixa adotada (Figura 4.60).

Tabela 4.25: Resultados obtidos através da planilha para determinação do traço unitário do CCR4 – 100% com consumo de cimento de 150 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	areia	brita 0	brita	areia	brita 0	brita	Mistura
		90874			30%	37%	33%	
1	25			0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	19		0	25	0,0	0,0	8,3	8,3
1 / 2 "	12,5		0	70	0,0	0,0	23,1	23,1
3 / 8 "	9,5	0	1	87	0,0	0,4	28,7	29,1
1 / 4 "	6,3	4	26	98	1,2	9,6	32,3	43,1
4	4,8	12	46	99	3,5	17,0	32,7	53,2
9	2,4	32	70	99	9,5	25,9	32,7	68,0
16	1,2	49	79	99	14,5	29,2	32,7	76,4
30	0,6	61	85	99	18,0	31,5	32,7	82,1
50	0,3	70	91	99	20,7	33,7	32,7	87,0
100	0,15	77	95	99	22,7	35,2	32,7	90,6
Fundo	< 0,15	100	100	100	29,5	37,0	33,0	99,5
Total		301	467	706				495
Relação(%)		30%	37%	33%	100%			
Mód. de finura		3,01	4,67	7,06				4,95
Massa específica		2,61	2,29	2,29				

Matéria Prima					
	cimento	areia	brita 0	brita	água
Massa unit.(kg/l)		1,75	1,29	1,20	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,29	2,29	
traço	1,000	3,515	4,403	3,927	1,29
kg/m3	150	526	659	588	193
16	2,421	8,508	10,658	9,506	3,123

Massa específica (t/m ³)		2,138
Umidade do concreto (%)		10,00
Teor de argamassa (%)		35,00
Relação água/cimento		1,29
Agregado		11,900
Consumo de cimento (kg/m ³)		150
areia	30%	3,515
brita 0	37%	4,403
brita 0	33%	3,927
TOTAL	100%	11,845

Figura 4.60: Curva granulométrica para CCR4 – 100% com consumo de cimento de 150 kg/m³

4.11 Preparação dos corpos-de-prova

Definida a umidade ótima para o CCR utilizando agregados naturais e a umidade para o CCR com as amostras de agregados reciclados, foram moldados três corpos-de-prova prismáticos para cada dosagem com diferentes consumos de cimento para definição do traço definitivo que atendessem uma resistência de tração na flexão de 2,5 MPa.

As dimensões dos corpos-de-prova prismáticos para o CCR* foi de 150 x 150 x 500 mm. Para os agregados reciclados, os corpos-de-prova tiveram dimensões reduzidas para 100 x 100 x 400 mm. Foi definido o número de golpes através da equação [4.1]:

$$E_p = \frac{P.h.n_g.n_c}{V} = \frac{4,536.45,7.160.2}{15.15.50} = 5,89 \text{kgf.cm.cm}^{-3} \text{ (para CP convencional)}$$

Os corpos-de-prova 100 x 100 x 400 mm, utilizando-se soquetes com peso 2,5 kg e altura de queda 30 cm, com a mesma energia potencial, foram compactados em duas camadas com 157 golpes cada. Usando procedimento semelhante, para os corpos-de-prova cilíndricos com dimensões reduzidas, foram compactados em 3 camadas de 40 golpes cada. Em ambos os casos, foram considerados a energia normal de compactação.

Na Tabela 4.26, são confrontados os resultados da resistência à tração na flexão aos 28 dias obtidos para seis corpos-de-prova com dimensões 150 x 150 x 500 mm e três corpos-de-prova com dimensões 100 x 100 x 400 mm. Pode ser concluído que é justificável a utilização de corpos-de-prova prismáticos com dimensões reduzidas para ensaios de resistência à tração na flexão para o CCR, como explorado detalhadamente por Cervo (2004).

Tabela 4.26: Confronto dos resultados obtidos para corpos-de-prova com medidas convencionais e reduzidas

150 x 150 x 500			100 x 100 x 400		
CP	$f_{ctm,28}$ (MPa)	Média (MPa)	CP	$f_{ctm,28}$ (MPa)	Média (MPa)
1	2,4	2,47	1	2,5	2,40
2	2,4		2	2,4	
3	2,5		3	2,3	
4	2,5		-	-	-
5	2,4		-	-	-
6	2,6		-	-	-

A Figura 4.61 ilustra a moldagem de um corpo-de-prova com aplicação de energia normal de compactação com auxílio do anel compensador (“colarinho”) e a Figura 4.62 mostra os corpos-de-prova com agregados reciclados – CCR3 e CCR4 – identificados, aguardando para serem desformados e posteriormente serem removidos para a câmara úmida para o período de cura do concreto.

Figura 4.61: Detalhe da moldagem de corpo-de-prova prismático para determinação da resistência à tração na flexão – dimensões reduzidas.

Figura 4.62: Corpos-de-prova moldados com dimensões reduzidas

4.12 Cura dos corpos-de-prova

Todos os corpos-de-prova foram desmoldados após um período de cerca de trinta e seis horas. Os ensaios para verificação das propriedades mecânicas foram realizados aos sete e vinte e oito dias após a cura do concreto em câmara úmida (Figura 4.63) mantida na temperatura média de 23°C com variação de até $\pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%.

Figura 4.63: Cura em câmara úmida

4.13 Execução dos ensaios

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos para o CCR utilizando agregados naturais britados e agregados reciclados.

4.13.1 Resistência à compressão simples

Foram moldados três corpos-de-prova para cada tipo de agregado utilizado para rompimento aos sete dias (total de quinze corpos-de-prova). Outros seis corpos-de-prova foram moldados com cada tipo de agregado para a determinação da resistência à compressão simples aos vinte e oito dias de idade (total de trinta corpos-de-prova). Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR 5739 (Figura 4.64).

Figura 4.64: Ensaio para determinação da resistência à compressão simples

4.13.2 Resistência à tração na flexão

Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados para rompimento aos sete e vinte e oito dias de acordo com a norma NBR 12142. Da mesma forma, foram moldados três corpos-de-prova para rompimento aos sete dias (total de quinze corpos-de-prova) e seis para vinte e oito dias (total de trinta) (Figura 4.65).

Figura 4.65: Ensaio para determinação da resistência à tração na flexão

4.13.3 Módulo de elasticidade

Para cada lote, foram utilizados dois corpos-de-prova cilíndricos para a determinação da carga média de ruptura à compressão, provenientes da mesma betonada, preparados e curados sob as mesmas condições. Para cargas a partir de 20% da carga média, em intervalos de 10% até um limite de 80%, foi determinada a curva tensão x deformação e os módulos de elasticidade para três corpos-de-prova com idades de vinte e oito dias (total de trinta corpos-de-prova). Os ensaios obedeceram à norma NBR 8522. (Figura 4.66)

Figura 4.66: Ensaio para determinação do módulo de elasticidade

4.13.4 Módulo de elasticidade por propagação de onda ultra-sônica

Para cada lote, foram utilizados dois corpos-de-prova prismáticos provenientes da mesma betonada, preparados e curados sob as mesmas condições. Todos os corpos-de-prova foram secados em estufa por 72 h. Os ensaios obedeceram à norma NBR 8802. O equipamento utilizado foi o *Pundit*, fabricado pela empresa inglesa *N.S. Eletronics Ltd*. Os ensaios foram realizados no Laboratório do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Construção Civil, CPqDCC da Escola Politécnica da USP.

O equipamento foi calibrado antes da primeira medição e após a realização de cada duas leituras, com a utilização de uma barra cilíndrica de aço de referência na qual o som propaga em $25,7 \mu\text{s}$ (Figura 4.67).

Figura 4.67: Calibração com utilização da barra cilíndrica de aço com 25,7 μ s

Para permitir o contato contínuo entre as superfícies, entre as faces dos transdutores e do material ensaiado, foi utilizada vaselina por fornecer boa conexão quando usada em corpos-de-prova com superfície lisa. Os transdutores foram posicionados nas faces opostas do material na maior dimensão para que ocorresse uma transmissão direta de ondas. Este tipo de transmissão é o mais recomendado para a determinação da velocidade de propagação de ondas através de um material, pois desta forma as ondas são recebidas com maior intensidade (Figura 4.68).

Figura 4.68: Determinação da velocidade de propagação de ondas por transmissão direta

Os corpos-de-prova tiveram suas dimensões e pesos medidos previamente ao ensaio, para obtenção do peso específico aparente seco (γ) em kgf/m³.

Com a distância L entre os pontos de acoplamento dos transdutores ao corpo-de-prova medida em m e o tempo (t) decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (medido em μ s), calcula-se a velocidade (v) de propagação de ondas em km/s conforme a seguinte fórmula:

$$v = \frac{L}{t} \quad [4.3]$$

Sendo L o comprimento do corpo-de-prova prismático. O produto do peso específico aparente seco pelo quadrado da velocidade (v) resulta no módulo de elasticidade dinâmico do material, conforme a fórmula:

$$E = v^2 \cdot \gamma \quad [4.4]$$

O módulo de elasticidade obtido também pode ser chamado de módulo de elasticidade ultra-sônico. Neste trabalho será denominado por módulo de elasticidade dinâmico.

4.13.5 Determinação da absorção de água, massa específica e porosidade

Os ensaios foram realizados de acordo com o que preconiza a norma NBR 9778/2005. Neste estudo, optou-se pelo ensaio de absorção por imersão por caracterizar melhor o volume de poros, já que permite avaliar a quantidade total de água absorvida (Carrijo, 2005). Os corpos-de-prova analisados foram secados em estufa à temperatura média de 105°C, imersos em água por 72 h e levados à fervura por 5 h para posterior pesagem em balança hidrostática.

Entende-se como absorção de água por imersão o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros

permeáveis, em relação à sua massa em estado seco. A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) por meio da norma C 125 define absorção como o processo pelo qual um líquido penetra e se dirige para preencher os poros permeáveis em um corpo sólido poroso, resultando a penetração do líquido nos poros permeáveis.

Define-se índice de vazios como sendo a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Pode ser utilizado como parâmetro para a avaliação da compacidade de um determinado material. Para o CCR, quanto menor for o índice de vazios dos agregados, melhor será o arranjo entre seus grãos e menor será a quantidade de finos necessária para o seu envolvimento, resultando em menor consumo de cimento da argamassa e do concreto, sendo mais adequada a coesão e a compacidade da mistura (Abreu,2002).

Para um arranjo denso de agregados com o menor índice de vazios possível, obtém-se uma mistura mais econômica, pois requer uma quantidade mínima de pasta, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994).

A massa específica da amostra seca é dada pela relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis.

A massa específica da amostra saturada é obtida pela relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, inclusive os poros permeáveis ou não.

A massa específica real é a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Este ensaio é de grande utilidade para a escolha do procedimento de mistura e para a quantificação do traço desejado.

4.13.6 Determinação da absorção de água por capilaridade

Os ensaios foram realizados de acordo com o que preconiza a norma NBR 9779/1995. O objetivo era determinar a absorção de água através da ascensão capilar no CCR endurecido.

Os corpos-de-prova prismáticos foram moldados segundo a norma NBR 5738. Foi determinada a massa dos corpos-de-prova ao ar e depois secados em estufa com temperatura média de 105°C até constância de massa (96h). Os corpos-de-prova foram resfriados ao ar à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e determinada nova massa. Posteriormente foram depositados em recipientes com água e suportes de forma que o nível de água permanecesse constante a (5 ± 1) mm acima de sua face inferior (Figura 4.69 e 4.70). Após 72 h, foram determinadas novas massas dos corpos-de-prova, sendo previamente enxugados com pano úmido. A absorção de água por capilaridade é calculada pela seguinte equação:

$$C = \frac{(A - B)}{S} \quad [4.5]$$

sendo:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

A = massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

B = massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$;

S = área da seção transversal, em cm².

Figura 4.69: Recipientes com (5 ± 1) mm de água

Figura 4.70: Detalhe do suporte para os CPs

4.13.7 Modificações Granulométricas dos agregados

4.13.7.1 Índice de Degradação dos agregados

O CCR é dosado considerando-se a especificação relativa à granulometria dos agregados constituintes da mistura. Para que se possa avaliar o comportamento mecânico do CCR como base de pavimento e entender-se o seu funcionamento estrutural, é necessário que os agregados mantenham suas características granulométricas de dosagem definidas em projeto, no decorrer da execução da obra e durante a vida útil deste pavimento.

Os agregados naturais britados e os reciclados de origens diferentes apresentam características particulares em função do tipo de materiais que o compõem e da sua distribuição granulométrica (LEITE, 2005).

Segundo o DNIT (2006), a granulometria do agregado, representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características que asseguram estabilidade aos pavimentos, em consequência do maior atrito interno obtido por entrosamento das partículas, desde a partícula mais graúda até a mais fina.

A etapa de manuseio dos materiais em laboratório, dosagem, preparação e execução da mistura em betoneira, serão chamadas neste trabalho de processamento da mistura, etapa esta anterior à moldagem e compactação dos corpos-de-prova. Estas etapas podem ocasionar a quebra dos agregados,

modificando suas características granulométricas. Esta alteração física do material pode gerar alterações no comportamento do CCR.

Foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento da dosagem de projeto, após a etapa de processamento e após a etapa de compactação. Seus resultados foram comparados para verificar-se eventuais modificações físicas do material e para calcular o índice de degradação (ID) em cada etapa estudada.

O ID foi obtido através da somatória dos deslocamentos Δi da curva granulométrica em cada peneira, dividido pelo número de peneiras, conforme a equação [4.5]. Foram utilizadas treze peneiras, de acordo com a NBR 7181 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Assim o ID é dado por:

$$ID = \frac{\sum \Delta i}{N} \quad [4.6]$$

onde:

ID = índice de degradação;

Δi = deslocamento da curva granulométrica de cada peneira;

N = número de peneiras em que foi realizada a granulometria.

Para ID = 0, entende-se como sendo para agregados com resistência suficiente a suportar a degradação, ou seja, agregados ideais. Para ID = 100, entende-se como sendo para agregados de péssima qualidade (MOTTA, 2004).

Os materiais de cada amostra foram dosados e misturados na umidade ótima e após a etapa de processamento, o material foi secado em estufa. A granulometria por peneiramento foi realizada após o material ser cuidadosamente destorroado manualmente a fim de evitar-se a quebra adicional de grãos.

Para a etapa de compactação, o corpo-de-prova era desmanchado e também secado na estufa e destorroado manualmente, para posterior verificação da granulometria por peneiramento. Para possibilitar a secagem, destorroamento

da mistura, trabalhabilidade do processo e execução das novas granulometrias, não foi adicionado cimento nas misturas estudadas.

A energia de compactação utilizada foi a normal, quando da elaboração dos corpos-de-prova cilíndricos 100 x 200 mm. São necessários 40 golpes por camada com o soquete de 2,5 kg e altura de queda de 30 cm. O material foi distribuído em três camadas.

A betoneira utilizada em laboratório foi da marca alemã Eirich de eixo vertical com capacidade para misturar 60l de concreto (Figura 4.71). As dosagens e os ensaios de granulometria foram realizados no laboratório da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

Neste trabalho, foram medidos os índices de degradação das duas etapas descritas, para cada dosagem estudada.

Figura 4.71: Betoneira utilizada para todas as misturas para todos os ensaios.

4.13.7.2 Coeficiente de Uniformidade

Através das curvas granulométricas obtidas após a etapa de processamento e a etapa de compactação, além da curva inicial de dosagem, foram calculados os coeficientes de uniformidade para cada curva e tipo de amostra do CCR.

O coeficiente de uniformidade é a razão entre os diâmetros, correspondentes a 60% e 10%, passantes na curva granulométrica (CAPUTO,1998), conforme a equação:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [4.7]$$

onde:

C_u = Coeficiente de uniformidade;

d_{60} = diâmetro correspondente a 60% que passa;

d_{10} = diâmetro correspondente a 10% que passa.

Esta relação mostra a falta de uniformidade, pois seu valor diminui quando o material é mais uniforme. Coeficientes de uniformidade inferiores a 15, indicam materiais de médio a muito uniformes (CAPUTO, 1998). Materiais mal graduados são materiais que apresentam boa uniformidade, podendo apresentar muitos vazios.

Coeficientes com valores altos significam materiais com graduação bem distribuída, podendo apresentar um grau de densificação maior, o que favorece seu comportamento na pavimentação (LEITE, 2005).

Os coeficientes de uniformidade foram calculados para a dosagem inicial do CCR como também para as etapas após o processo e após a compactação para verifica-se a sua eventual evolução. Também foram confrontados os resultados entre as diferentes amostras, tanto para o agregado natural britado como para os agregados reciclados.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Definição do consumo de cimento para o CCR*

Com a utilização de agregados naturais britados foram dosados concretos com consumo de 90 kg/m³, 110 kg/m³ e 130 kg/m³ na umidade ótima de 6% conforme item 4.10 deste trabalho. Foi determinada a resistência à tração na flexão pela média de três corpos-de-prova aos vinte e oito dias para cada consumo de cimento.

Com os pares resistência x consumo de cimento obtidos, pode-se definir graficamente o consumo de cimento necessário para a resistência tração na flexão de 2,5 MPa para o CCR, de acordo com o tipo de agregado utilizado. A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos com o CCR* e pela Figura 5.1 pode-se definir graficamente o consumo de cimento de 110 kg/m³ como o necessário para obter-se a resistência à tração na flexão pretendida.

Tabela 5.1: Resultados obtidos para o CCR*

Cimento CP III 40 RS	Resistência á Tração na Flexão (MPa)	
	28 dias	Média
C = 90kg/m ³	2,1	2,0
	1,9	
	2,1	
C = 110kg/m ³	2,5	2,5
	2,4	
	2,6	
C = 130kg/m ³	2,9	3,1
	3,1	
	3,2

Figura 5.1: CCR* – definido 110 kg/m³ de consumo de cimento

5.2 Definição do consumo de cimento do CCR com agregados reciclados

Para o CCR com agregados reciclados foram utilizados, para todas as amostras, concretos com consumos de 110 kg/m³, 130 kg/m³ e 150 kg/m³ conforme dosagens apresentadas no item 4.10. Foram moldados três corpos-de-prova prismáticos para cada consumo de cimento e determinada a resistência à tração na flexão aos vinte e oito dias, para cada tipo de amostra de agregado reciclado.

5.2.1 Para o CCR1

A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos para o CCR1. Pela Figura 5.2 foi definido graficamente o consumo de cimento 125 kg/m³ como o necessário para obter-se uma resistência à tração na flexão de 2,5 MPa.

Tabela 5.2: Resultados obtidos para o CCR1

Cimento CP III 40 RS	Resistência á Tração na Flexão (MPa)	
	28 dias	Média
C = 110kg/m ³	2,0	2,0
	2,0	
	1,9	
C = 130kg/m ³	2,7	2,6
	2,5	
	2,7	
C = 150kg/m ³	3,0	2,9
	3,1	
	2,7

Figura 5.2: CCR1 – definido 125 kg/m³ de consumo de cimento

5.2.2 Para o CCR3

A Tabela 5.3 mostra os resultados obtidos para o CCR3. Pela Figura 5.3 foi definido graficamente o consumo de cimento 120 kg/m^3 como o necessário para obter-se uma resistência à tração na flexão de $2,5 \text{ MPa}$.

Tabela 5.3: Resultados obtidos para o CCR3.

Cimento CP III 40 RS	Resistência á Tração na Flexão (MPa)	
	28 dias	Média
C = 110 kg/m^3	2,3	2,2
	2,2	
	2,0	
C = 130 kg/m^3	2,7	2,7
	2,8	
	2,6	
C = 150 kg/m^3	2,9	2,8
	2,7	
	2,9

Figura 5.3: CCR 3 – definido 120 kg/m^3 de consumo de cimento

5.2.3 Para o CCR4

A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos para o CCR4. Pela Figura 5.4 foi definido graficamente o consumo de cimento 120 kg/m³ como o necessário para obter-se uma resistência à tração na flexão de 2,5 MPa.

Tabela 5.4: Resultados obtidos para o CCR4

Cimento CP III 40 RS	Resistência á Tração na Flexão (MPa)	
	28 dias	Média
C = 110kg/m ³	2,3	2,3
	2,3	
	2,3	
C = 130kg/m ³	2,7	2,6
	2,6	
	2,6	
C = 150kg/m ³	3,1	3,0
	3,0	
	2,8

Figura 5.4: CCR4 – definido 120 kg/m³ de consumo de cimento

5.2.4 Para o CCR4 – 100%

A Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos para o CCR4 – 100%. Pela Figura 5.5 foi definido graficamente o consumo de cimento 125 kg/m³ como o necessário para obter-se uma resistência à tração na flexão de 2,5 MPa.

Tabela 5.5: Resultados obtidos para o CCR4 – 100%

Cimento CP III 40 RS	Resistência á Tração na Flexão (MPa)	
	28 dias	Média
C = 110kg/m ³	2,2	2,3
	2,3	
	2,3	
C = 130kg/m ³	2,5	2,6
	2,7	
	2,5	
C = 150kg/m ³	2,8	2,8
	2,7	
	2,9

Figura 5.5: CCR4 – 100% – definido 125 kg/m³ de consumo de cimento

5.3 Definição das dosagens de acordo com os consumos de cimento obtidos

5.3.1 Dosagem para o CCR*

Para o CCR* foi definida uma dosagem com 110 kg/m³ de consumo de cimento. De acordo com o consumo de cimento e a umidade ótima definida para o CCR*, a dosagem para os ensaios de verificação do comportamento mecânico é aquela apresentada anteriormente na Tabela 4.12 e Figura 4.42.

5.3.2 Dosagem para o CCR1

Para o CCR1, com a umidade de 8,4% e o consumo de cimento definido de 125 kg/m³, é apresentada a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 5.6) e a curva granulométrica obtida em relação a adotada (Figura 5.6).

Tabela 5.6: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR1 com consumo de cimento de 125 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia	Brita 0	Brita	Areia	BRITA 0	Brita	Mistura
		90874			35%	31%	34%	
1	25			3	0,0	0,0	1,0	1,0
3/4"	19		0	31	0,0	0,0	10,5	10,5
1 / 2 "	12,5		0	75	0,0	0,0	25,5	25,5
3 / 8 "	9,5	0	3	93	0,0	0,9	31,6	32,6
1 / 4 "	6,3	4	36	100	1,4	11,2	34,0	46,6
4	4,8	12	70	100	4,2	21,7	34,0	59,9
9	2,4	32	97	100	11,2	30,1	34,0	75,3
16	1,2	49	99	100	17,2	30,7	34,0	81,9
30	0,6	61	99	100	21,4	30,7	34,0	86,1
50	0,3	70	99	100	24,6	30,7	34,0	89,3
100	0,15	77	99	100	27,1	30,7	34,0	91,7
Fundo	< 0,15	100	100	100	35,1	31,0	34,0	100,1
Total		301	566	724				527
Relação (%)		35%	31%	34%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,66	7,24				5,27
Massa Específica		2,61	2,55	2,54				

	Matéria Prima				
	Cimento	Areia	Brita 0	Brita	água
massa unit. (kg/l)	xxx	1,75	1,39	1,34	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,55	2,54	
traço	1,000	5,546	4,894	5,367	1,41
kg/m3	125	695	613	672	177
14	1,772	9,826	8,669	9,508	2,498

Massa específica do concreto (kg/cm²)		2,305
Umidade do concreto (%)		8,40
Teor de argamassa (%)		39,00
Relação água/cimento		1,41
Agregado		15,786
Consumo de cimento(kg/m³)		125
Areia (kg)	35%	5,546
Brita 0 (kg)	31%	4,894
Brita (kg)	34%	5,367
TOTAL	100%	15,807

Figura 5.6: Curva granulométrica obtida para o CCR1 com consumo de cimento de 125 kg/m³

5.3.3 Dosagem para o CCR3

Para o CCR3, com a umidade definida em 8,8% e o consumo de cimento com 120 kg/m³, é apresentada a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 5.7) e a curva granulométrica obtida em relação a adotada (Figura 5.7).

Tabela 5.7: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR3 com consumo de cimento de 120 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita	Areia 35%	Brita 0 32%	Brita 33%	Mistura
1	25			1	0,0	0,0	0,3	0,3
3/4"	19		0	28	0,0	0,0	9,2	9,2
1 / 2 "	12,5		0	76	0,0	0,0	25,1	25,1
3 / 8 "	9,5	0	2	94	0,0	0,6	31,0	31,7
1 / 4 "	6,3	4	31	100	1,4	9,9	33,0	44,3
4	4,8	12	64	100	4,2	20,5	33,0	57,7
9	2,4	32	94	100	11,3	30,1	33,0	74,3
16	1,2	49	97	100	17,2	31,0	33,0	81,3
30	0,6	61	98	100	21,5	31,4	33,0	85,8
50	0,3	70	99	100	24,6	31,7	33,0	89,3
100	0,15	77	100	100	27,1	32,0	33,0	92,1
Fundo	< 0,15	100	100	100	35,2	32,0	33,0	100,2
Total		301	554	722				521
Relação (%)		35%	32%	33%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,54	7,22				5,21
Massa Específica		2,61	2,50	2,43				

	Matéria Prima				
	Cimento	Areia	Brita 0	Brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,43	1,25	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,50	2,43	
traço	1,000	5,648	5,135	5,295	1,50
kg/m3	120	679	617	637	180
14	1,701	9,605	8,732	9,005	2,551

Massa específica de concreto (kg/cm ²)	2,257
Umidade do concreto (%)	8,80
Teor de argamassa (%)	39,00
Relação água/cimento	1,50
Agregado	16,045
Consumo de cimento(kg/m ³)	120
Areia (kg)	35%
Brita 0 (kg)	32%
Brita (kg)	33%
TOTAL	100%

Figura 5.7: Curva granulométrica obtida para o CCR3 com consumo de cimento de 120 kg/m³

5.3.4 Dosagem para o CCR4

Para o CCR4 com a umidade definida em 8,9% e o consumo de cimento de 120 kg/m³, é apresentada a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 5.8) e a curva granulométrica obtida em relação a adotada (Figura 5.8)

Tabela 5.8: Resultados obtidos através da planilha eletrônica para determinação do traço unitário do CCR4 com consumo de cimento de 120 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia 90874	Brita 0	Brita 0	Areia 35%	Brita 0 31%	Brita 34%	Mistura
1	25			0	0,0	0,0	0,0	0,0
¾"	19		0	25	0,0	0,0	8,5	8,5
1 / 2 "	12,5		0	70	0,0	0,0	23,8	23,8
3 / 8 "	9,5	0	1	87	0,0	0,3	29,6	29,9
1 / 4 "	6,3	4	29	98	1,4	9,0	33,3	43,7
4	4,8	12	59	99	4,2	18,3	33,7	56,2
9	2,4	32	85	99	11,2	26,4	33,7	71,2
16	1,2	49	91	99	17,2	28,2	33,7	79,1
30	0,6	61	94	99	21,4	29,1	33,7	84,2
50	0,3	70	96	99	24,6	29,8	33,7	88,0
100	0,15	77	98	99	27,0	30,4	33,7	91,1
Fundo	< 0,15	100	100	100	35,1	31,0	34,0	100,1
Total		301	524	706				508
Relação (%)		35%	31%	34%	100%			
Mód. de finura		3,01	5,24	7,06				5,08
Massa Específica		2,61	2,47	2,29				

	Matéria Prima				
	Cimento	Areia	Brita 0	Brita	água
massa unit.(kg/l)		1,75	1,44	1,20	
massa esp.(kg/L)	2,98	2,61	2,47	2,29	
traço	1,000	5,529	4,880	5,352	1,49
kg/m3	120	663	585	642	179
14	1,696	9,375	8,274	9,075	2,526

Massa específica do concreto (kg/cm²)		2,210
Umidade do concreto (%)		8,90
Teor de argamassa (%)		39,00
Relação água/cimento		1,49
Agregado		15,742
Consumo de cimento(kg/m³)		120
Areia (kg)	35%	5,529
Brita 0 (kg)	31%	4,880
Brita (kg)	34%	5,352
TOTAL	100%	15,761

Figura 5.8: Curva granulométrica obtida para o CCR4 com consumo de cimento de 120 kg/m³

5.3.5 Dosagem para o CCR4 – 100%

Para o CCR4 – 100%, com umidade de 10% e o consumo de cimento definido de 125 kg/m³, é apresentada a planilha para determinação do traço e suas principais características físicas (Tabela 5.9) e a curva granulométrica obtida em relação a adotada (Figura 5.9).

Tabela 5.9: Resultados obtidos através da planilha para determinação do traço unitário do CCR4 – 100% com consumo de cimento de 125 kg/m³ e principais características físicas.

Peneira No.	Abertura (mm)	Areia	Brita 0	Brita	Areia	Brita 0	Brita	Mistura
		90874			31%	37%	32%	
1	25			0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	19		0	25	0,0	0,0	8,0	8,0
1 / 2 "	12,5		0	70	0,0	0,0	22,4	22,4
3 / 8 "	9,5	0	1	87	0,0	0,4	27,8	28,2
1 / 4 "	6,3	4	26	98	1,2	9,6	31,4	42,2
4	4,8	12	46	99	3,7	17,0	31,7	52,4
9	2,4	32	70	99	9,8	25,9	31,7	67,3
16	1,2	49	79	99	15,0	29,2	31,7	75,9
30	0,6	61	85	99	18,6	31,5	31,7	81,7
50	0,3	70	91	99	21,4	33,7	31,7	86,7
100	0,15	77	95	99	23,5	35,2	31,7	90,3
Fundo	< 0,15	100	100	100	30,5	37,0	32,0	99,5
Total		301	467	706				491
Relação (%)		31%	37%	32%	100%			
Mód. de finura		3,01	4,67	7,06				4,91
Massa específica		2,61	2,29	2,29				

Matéria Prima					
	cimento	areia	brita 0	brita	água
massa unit. (kg/l)		1,75	1,29	1,20	
massa esp (kg/l)	2,98	2,61	2,29	2,29	
traço	1,000	4,425	5,365	4,640	1,55
kg/m3	125	551	668	578	193
4	0,503	2,226	2,699	2,335	0,780

Massa específica		2,136
Umidade do concreto (%)		10,00
Teor de argamassa (%)		35,00
Relação água/cimento		1,55
Agregado		14,500
Consumo de cimento(kg/m³)		125
areia (kg)	31%	4,425
brita 0 (kg)	37%	5,365
brita (kg)	32%	4,640
TOTAL	100%	14,430

Figura 5.9: Curva granulométrica obtida para CCR4 – 100% com consumo de cimento de 125 kg/m³

5.4 Traços finais do CCR de acordo com o agregado utilizado

A Tabela 5.10 apresenta os traços definidos em função do tipo de cimento escolhido, o seu consumo e os respectivos valores de umidades ótimas. Cabe lembrar que as umidades dos concretos com utilização de agregados reciclados foram definidas 1% abaixo da umidade ótima. Para o CCR* utilizando agregados naturais britados, fazem parte da dosagem a areia, brita 0, brita 1 e brita 2. Para o CCR utilizando agregados reciclados de RCD, fazem parte a areia, brita 0 (50% reciclado e 50% natural) e brita (aqui denominado como o material resultante da usina de reciclagem entre brita 1 e 2).

Definidas as dosagens para os concretos com todos os tipos de agregados, consumo de cimento e umidade, procedeu-se a moldagem dos respectivos corpos-de-prova para posterior confronto e avaliação dos resultados obtidos das propriedades mecânicas do CCR, objeto deste estudo.

Tabela 5.10: Traços em massa definidos para os ensaios de avaliação das propriedades do CCR

Consumo (kg/m³)	CCR	Traço unitário em massa	Umidade ótima (%)
110	CCR*	1 : 8,225 : 5,070 : 4,290 : 1,950	6,0
125	CCR1	1 : 5,546 : 4,894 : 5,367	8,4
120	CCR3	1 : 5,648 : 5,135 : 5,295	8,8
120	CCR4	1 : 5,529 : 4,880 : 5,352	8,9
125	CCR4 - 100%	1 : 4,425 : 5,365 : 4,640	10,0

5.5 Resultados da resistência à compressão

Seguem abaixo os resultados da resistência à compressão, obtidos com o CCR preparado com o cimento Barroso CP III 40/RS, ensaiados conforme a metodologia NM 101 – “Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”.

5.5.1 Resistência à compressão do CCR*

Na Tabela 5.11 são apresentados os resultados obtidos para o CCR* aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.11: Resultados da resistência à compressão do CCR*

Resistência à compressão axial			
CCR*	CPs	fck (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	8,3	8,6
	2	9,0	
	3	8,5	
28 dias	1	11,9	12,2
	2	12,3	
	3	11,6	
	4	12,0	
	5	13,3	
	6	12,3	

5.5.2 Resistência à compressão do CCR1

Na Tabela 5.12 são apresentados os resultados obtidos para o CCR1 aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.12 Resultados da resistência à compressão do CCR1

Resistência à compressão axial			
CCR1	CPs	fck (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	8,5	8,3
	2	8,9	
	3	7,4	
28 dias	1	12,3	11,9
	2	10,8	
	3	13,1	
	4	11,8	
	5	11,9	
	6	11,2	

5.5.3 Resistência à compressão do CCR3

Na Tabela 5.13 são apresentados os resultados obtidos para o CCR3 aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.13 Resultados da resistência à compressão do CCR3

Resistência à compressão axial			
CCR3	CPs	fck (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	11,3	10,6
	2	10,7	
	3	9,7	
28 dias	1	12,6	13,0
	2	10,8	
	3	14,2	
	4	13,6	
	5	13,4	
	6	13,4	

5.5.4 Resistência à compressão do CCR4

Na Tabela 5.14 são apresentados os resultados obtidos para o CCR4 aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.14 Resultados da resistência à compressão do CCR4

Resistência à compressão axial			
CCR4	CPs	fck (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	10,4	10,1
	2	10,1	
	3	9,9	
28 dias	1	12,2	11,9
	2	12,3	
	3	11,3	
	4	14,5	
	5	8,7	
	6	12,3	

5.5.5 Resistência à compressão do CCR4 – 100%

Na Tabela 5.15 são apresentados os resultados obtidos para o CCR4 aos sete e aos vinte e oito dias de idade

Tabela 5.15 Resultados da resistência à compressão do CCR4 – 100%

Resistência à compressão axial			
CCR4 100%	CPs	fck (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	10,0	10,0
	2	10,0	
	3	9,9	
28 dias	1	12,8	13,0
	2	12,1	
	3	12,9	
	4	13,3	
	5	13,8	
	6	12,9	

5.6 Resultados da resistência à tração na flexão

Seguem abaixo os resultados da resistência à tração na flexão ensaiados conforme a metodologia NM 55 – “Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova cilíndricos”.

5.6.1 Resistência à tração na flexão do CCR*

Na Tabela 5.16 são apresentados os resultados obtidos para o CCR* aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.16 Resultados da resistência à tração na flexão do CCR*

Resistência à tração na flexão			
CCR*	CPs	fct,f (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	1,2	1,3
	2	1,7	
	3	1,0	
28 dias	1	2,4	2,5
	2	2,4	
	3	2,5	
	4	2,5	
	5	2,4	
	6	2,6	

5.6.2 Resistência à tração na flexão do CCR1

Na Tabela 5.17 são apresentados os resultados obtidos para o CCR1 aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.17 Resultado da resistência à tração na flexão do CCR1

Resistência à tração na flexão			
CCR1	CPs	fct,f (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	1,7	1,8
	2	1,8	
	3	1,9	
28 dias	1	3,1	2,7
	2	2,6	
	3	2,8	
	4	2,5	
	5	2,7	
	6	2,5	

5.6.3 Resistência à tração na flexão do CCR3

Na Tabela 5.18 são apresentados os resultados obtidos para o CCR3 aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.18 Resultado da resistência à tração na flexão do CCR3

Resistência à tração na flexão			
CCR3	CPs	fct,f (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	2,0	2,0
	2	1,8	
	3	2,1	
28 dias	1	2,8	2,7
	2	2,8	
	3	2,6	
	4	2,7	
	5	2,6	
	6	2,6	

5.6.4 Resistência à tração na flexão do CCR4

Na tabela 5.19 são apresentados os resultados obtidos para o CCR4 aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.19 Resultado da resistência à tração na flexão do CCR4

Resistência à tração na flexão			
CCR4	CPs	fct,f (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	2,4	2,1
	2	2,0	
	3	2,0	
28 dias	1	2,6	2,7
	2	2,7	
	3	2,6	
	4	2,6	
	5	2,9	
	6	2,6	

5.6.5 Resistência à tração na flexão do CCR4 – 100%

Na Tabela 5.20 são apresentados os resultados obtidos para o CCR4 aos sete e aos vinte e oito dias de idade.

Tabela 5.20 Resultado da resistência à tração na flexão do CCR4 – 100%

Resistência à tração na flexão			
CCR4 100%	CPs	fct,f (MPa)	Média (MPa)
7 dias	1	1,9	1,8
	2	1,8	
	3	1,8	
28 dias	1	2,4	2,5
	2	2,3	
	3	2,5	
	4	2,5	
	5	2,4	
	6	2,7	
	7	2,8	

5.7 Módulo de elasticidade

Seguem abaixo os resultados dos diagramas tensão-deformação obtidos nos ensaios para definição dos módulos de elasticidade para as diversas dosagens de CCR objeto deste estudo, de acordo com a norma NBR 8522 – “Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação.

5.7.1 Diagrama tensão-deformação do CCR*

Na Figura 5.10 são apresentados os resultados relativos às curvas tensão-deformação para corpos-de-prova cilíndricos para obtenção do módulo de elasticidade estático para o CCR* aos vinte e oito dias.

Figura 5.10: Diagrama tensão-deformação para o CCR*

5.7.2 Diagrama tensão-deformação do CCR com agregados reciclados

Na Figura 5.11 a 5.14 são apresentados os resultados relativos às curvas tensão-deformação para corpos-de-prova cilíndricos para obtenção do módulo de elasticidade estático para os CCR1, CCR3, CCR4 e CCR4 – 100%, dosados com agregados reciclados aos vinte e oito dias. No caso do CCR4 – 100%, o corpo-de-prova de número 2 rompeu durante o teste sendo este resultado descartado.

Figura 5.11: Diagrama tensão-deformação para o CCR1

Figura 5.12: Diagrama tensão-deformação para o CCR3

Figura 5.13: Diagrama tensão-deformação para o CCR4

Figura 5.14: Diagrama tensão-deformação para o CCR4 – 100%

5.8 Módulo de elasticidade com utilização de onda ultra-sônica

Na Tabela 5.21 são apresentados os resultados obtidos para todos os CCR usados nesse trabalho empregando-se o equipamento de pulso elétrico de baixa frequência ultra-sônica e alta estabilidade e precisão de leitura (da ordem de 0,1 μ s), transdutor emissor e receptor para transformação do pulso elétrico em onda de choque e novamente em pulso elétrico e circuito medidor de tempo de propagação de onda que pode ser lido em mostrador digital.

Como comentado anteriormente, o módulo de elasticidade é a resultante do produto da velocidade ao quadrado pelo peso específico do material estudado. Foram ensaiados dois corpos-de-prova para cada tipo de agregado estudado nas dosagens dos CCR, totalizando dez exemplares.

Tabela 5.21: Resultados do módulo de elasticidade com onda ultra-sônica

CP	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Massa (kg)	Peso específico aparente seco (kg/m ³)	Tempo (μ s)	Velocidade (km/s)	E (MN/m ²)
CCR* 1	0,40000	0,10000	0,10200	9,38500	2.300,25	107,6	3,717472	31.788
CCR* 2	0,40250	0,10000	0,10300	9,44300	2.277,75	111,7	3,603402	29.576
CCR1 1	0,40100	0,09950	0,10200	9,00500	2.212,67	120,5	3,327801	24.504
CCR1 2	0,40150	0,10250	0,10100	9,07600	2.183,55	115,5	3,476190	26.386
CCR3 1	0,40100	0,10000	0,10150	8,72900	2.144,64	128,5	3,120623	20.885
CCR3 2	0,39950	0,10050	0,10200	8,80700	2.150,53	130,2	3,068356	20.247
CCR4 1	0,39700	0,10050	0,10250	8,58000	2.098,01	124,4	3,191318	21.367
CCR4 2	0,40150	0,10100	0,10350	8,82200	2.101,94	128,3	3,129384	20.584
CCR4 100% 1	0,40050	0,10050	0,10350	8,29500	1.991,17	139,4	2,873027	16.436
CCR4 100% 2	0,40100	0,10000	0,10300	8,40400	2.034,72	137,6	2,914244	17.281

5.9 Determinação da absorção de água, massa específica e porosidade

Na Tabela 5.22 são apresentados os resultados obtidos para cada tipo de CCR estudado, de acordo com o agregado utilizado na dosagem. Foram moldados dois corpos-de-prova para cada mistura resultando em dez exemplares.

Tabela 5.22: Resultados obtidos para absorção de água, massa específica e porosidade

Amostra	Massa ao ar (g)	Massa seca (g)	Massa após fervura SS (g)	Massa após fervura IM (g)	Absorção após imersão e fervura (%)		Índice de vazios após saturação e fervura (%)		Massa específica seca (g/cm³)		Massa específica após saturação e fervura (g/cm³)		Densidade real (g/cm³)	
					indiv.	média	indiv.	média	indiv.	média	indiv.	média	indiv.	média
CCR *	9.637	9.312	9.764	5.766	4,9	4,8	11,3	11,2	2,33	2,33	2,44	2,44	2,63	2,62
CCR *	9.650	9.396	9.841	5.808	4,7		11,0		2,33		2,44		2,62	
CCR 1	9.359	8.919	9.520	5.488	6,7	6,8	14,9	14,4	2,21	2,13	2,36	2,28	2,60	2,49
CCR 1	9.386	8.987	9.598	5.227	6,8		14,0		2,06		2,20		2,39	
CCR 3	9.054	8.627	9.302	5.279	7,8	8,0	16,8	17,1	2,14	2,14	2,31	2,31	2,58	2,58
CCR 3	9.218	8.678	9.381	5.324	8,1		17,3		2,14		2,31		2,59	
CCR 4	8.996	8.546	9.164	5.188	7,2	7,2	15,5	15,4	2,15	2,15	2,30	2,30	2,54	2,54
CCR 4	9.184	8.809	9.435	5.333	7,1		15,3		2,15		2,30		2,53	
CCR4 100%	8.788	8.266	9.017	4.959	9,1	9,0	18,5	18,4	2,04	2,04	2,22	2,23	2,50	2,50
CCR4 100%	8.816	8.370	9.122	5.030	9,0		18,4		2,05		2,23		2,51	

5.10. Determinação da absorção de água por capilaridade

Na Tabela 5.23 são apresentados os resultados obtidos para cada tipo de CCR estudado para a determinação da absorção por capilaridade, de acordo com o agregado utilizado na dosagem. Foram moldados dois corpos-de-prova para cada mistura resultando em dez exemplares.

Tabela 5.23: Resultados obtidos para absorção de água por capilaridade

Corpos-de-prova	Massa ao ar (g)	Massa seca após 96hs (g)	Massa ao atingir 23 ± 2°C (g) (B)	Massa após imersão em água 72hs (g) (A)	Comprimento do CP (cm)	Largura do CP (cm)	Seção transversal (cm²) (S)	Absorção de água por capilaridade (g/cm²) (C)
CCR *	9637	9312	9338	9745	40	10	400	1,0
CCR *	9650	9396	9404	9808	40	10	400	1,0
CCR 1	9359	8919	8877	9505	40	10	400	1,6
CCR 1	9386	8987	8966	9585	40	10	400	1,5
CCR 3	9054	8627	8608	9279	40	10	400	1,7
CCR 3	9218	8678	8664	9354	40	10	400	1,7
CCR 4	8996	8546	8480	9090	40	10	400	1,5
CCR 4	9184	8809	8728	9347	40	10	400	1,5
CCR 4 100%	8788	8266	8207	8878	40	10	400	1,7
CCR 4 100%	8816	8370	8313	8992	40	10	400	1,7

5.11 Modificações Granulométricas dos agregados

5.11.1 Índice de Degradação dos agregados

Foram realizadas as granulometrias por peneiramento para a amostra de CCR com agregados naturais britados e para cada amostra utilizando agregados reciclados. As granulometrias foram realizadas para as misturas relativas a dosagem de projeto, após o processamento do material e após a compactação do CCR, obtendo-se quinze curvas granulométricas.

A etapa após o processamento teve o objetivo de simular em laboratório, a degradação dos materiais com as operações no campo de dosagem e mistura dos materiais numa usina de concreto, seu transporte em caminhão betoneira ou basculante, lançamento e espalhamento na pista.

A etapa após a compactação, teve o objetivo de simular em laboratório, a degradação dos materiais com as operações de compactação que ocorrem no campo durante a execução de uma obra.

Nas figuras apresentadas na sequência, para cada CCR dosado com cada amostra de agregados, pode-se verificar nos gráficos contendo a porcentagem passante, a variação do tamanho dos grãos e para os gráficos que apresentam a porcentagem retida, pode-se verificar em quais peneiras ocorreram esta variação.

5.11.1.1 Índice de Degradação do CCR*

Na Figura 5.15 são apresentados os resultados relativos ao ID para o CCR* para as três etapas estudadas.

Figura 5.15: Curvas granulométricas do CCR*

Índice de Degradação do CCR1

Na Figura 5.16 são apresentados os resultados relativos ao ID para o CCR1 para as três etapas estudadas.

Figura 5.16: Curvas granulométricas do CCR1.

5.11.1.2 Índice de Degradação do CCR3

Na Figura 5.17 são apresentados os resultados relativos ao ID para o CCR3 para as três etapas estudadas.

Figura 5.17: Curvas granulométricas do CCR3.

5.11.1.3 Índice de Degradação do CCR4

Na Figura 5.18 são apresentados os resultados relativos ao ID para o CCR4 para as três etapas estudadas.

Figura 5.18: Curvas granulométricas do CCR4.

5.11.1.4 Índice de Degradação do CCR4 – 100%

Na Figura 5.19 são apresentados os resultados relativos ao ID para o CCR4 – 100% para as três etapas estudadas.

Figura 5.19: Curvas granulométricas do CCR4 – 100%

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Consumo de cimento dos CCR estudados

Na Figura 6.1 pode-se observar o crescimento da resistência à tração na flexão com o aumento do consumo de cimento para todos os CCR estudados. Para esta pesquisa, foi adotada a resistência à tração na flexão de 2,5 MPa aos 28 dias de idade como padrão para um CCR empregado como base de pavimentos asfálticos rígido-híbridos (BALBO;2007) e pelo fato de atender a vários padrões de volume de tráfego comercial para rodovias. O tipo de cimento utilizado foi o CP III 40 RS.

Assim sendo, os consumos de cimento adotados foram 110 kg/m³ para o CCR*, 125 kg/m³ para o CCR1 e CCR4 100% e 120 kg/m³ para o CCR3 e CCR4. Para que pudesse ser atingida a resistência desejada, foi necessário um aumento do consumo de cimento do CCR3 e CCR4 em relação ao CCR* adotado como referência de apenas 9%. Para o CCR1 e CCR4 100%, este aumento de consumo de cimento foi de 13,5%.

Alguns autores (TRICHÊS,1993; DIAZ,1993) indicaram que para o CCR com agregados naturais britados a ruptura ocorre através dos grãos para consumos de cimento mais elevados. Para consumos inferiores a 125 kg/m³, esta ruptura se dá na argamassa. Apesar da análise das superfícies de ruptura dos corpos-de-prova não terem sido objeto deste estudo, pode-se entender este fato como um dos motivos dos diversos tipos de CCR estudados terem apresentado o mesmo resultado de resistência à tração na flexão com baixa variação de consumo de cimento.

Figura 6.1: gráfico consumo de cimento x resistência à tração na flexão para todos os CCR estudados

6.2 Resistência à compressão dos CCR

Na Tabela 6.1 são apresentados os resultados de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias para o CCR com cada tipo de agregado utilizado. O CCR* teve incremento de resistência dos 7 aos 28 dias de 42%; este incremento, para os CCR1, CCR3, CCR4 e CCR4 - 100% foi, respectivamente, de 43%, 23%, 18% e 30%. Assim, pode-se verificar que o CCR1, empregando RCD da amostra 1 (essencialmente resíduo de concreto de cimento Portland, mais denso) não apresentou alteração de ganho de resistência à compressão no período.

Tabela 6.1: Resistência à compressão dos CCR estudados

Resistência à compressão axial (MPa)					
Idade (dias)	Agregados Naturais	Agregados Reciclados			
	CCR* (C=110 kg/m ³)	CCR 1 (C=125 kg/m ³)	CCR 3 (C=120 kg/m ³)	CCR 4 (C=120 kg/m ³)	CCR 4 (100%) (C=125 kg/m ³)
7	8,6	8,3	10,6	10,1	10,0
28	12,2	11,9	13,0	11,9	13,0

Para os concretos empregando RCD composto por agregados de outra natureza que não o concreto britado, esse ganho de resistência no tempo diminuiu em relação ao CCR* e o CCR1. Isto deve ser entendido com base no fato que os CCR3, CCR4 e CCR4 - 100% apresentaram ganho de resistência maior que o CCR* e o CCR1 em torno de 20% superior aos 7 dias.

Embora as resistências finais não apresentem alterações muito importantes, observando-se todos os casos e tendo em conta o aumento do consumo de cimento (C) para os CCR com RCD, tem-se claro que a presença de RCD com maior quantidade de agregados de origem cerâmica (menos denso) afetou o ganho de resistência de modo mais apreciável aos 7 dias. Uma possível explicação seria a maior quantidade de finos cerâmicos nas misturas posto que tais finos, presentes inclusive nas frações granulométricas mais grosseiras no momento da elaboração dos concretos, teria implicado em maior pozolanicidade das partículas. Observa-se que os concretos CCR e CCR1 têm aumento de resistência similar em ambas as idades.

Ao comparar-se o CCR* com CCR1 tem-se que para o CCR1 atingir resistência à compressão similar ao CCR* foi necessário o aumento do consumo de cimento de 110 para 125 kg/m³ (14%). Nos demais casos, a resistência final foi atingida ou superada mesmo com pequena redução do consumo de cimento para 120 kg/m³ (9% de acréscimo em relação ao CCR*), exceção ao CCR4 (100%) com consumo de 125 kg/m³.

Os resultados indicam o bom potencial, em termos de ganho de resistência à compressão, do uso do CCR com RCD, sendo que inclusive, o emprego de 100% de brita zero e brita provenientes de RCD não incorreu em perdas de qualidade nas resistências aferidas (CCR4 – 100%).

Na Figura 6.2 são apresentados diversos resultados obtidos para resistência à compressão aos 7 dias para CCR com dosagem utilizando agregados naturais britados. Apesar do resultado obtido por Balbo (1993) para a brita graduada com cimento (BGTC) de 8,1 MPa, cabe lembrar que o ensaio foi realizado utilizando-se a energia modificada para a compactação e para a dosagem foi

adotada umidade 1,5% abaixo da umidade ótima no ramo seco. A dosagem apresentou ainda relação água/cimento (a/c) próximo de 1,0. O CCR utilizado na obra da Serra do Rio do Rastro, apresentou consumo de cimento de 140 kg/m³ atingindo 6,7 MPa para a mesma idade.

Os trabalhos realizados por Diaz (1993) e Trichês (1993) apresentaram resultados de resistência crescentes para CCR com granulometria fina (F), média (M) e grossa (G) para cada consumo de cimento estudado. Cho e Yeo (2004) utilizaram consumo de cimento de 170 kg/m³ e relação água/cimento igual a 1 por ser padrão exigido na Coreia.

No presente trabalho, o CCR com agregados naturais britados foi elaborado com consumo de cimento de 110 Kg/m³ e relação água/cimento de 1,23. A mistura foi dosada na umidade ótima de compactação de 6,0%

Figura 6.2: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à compressão aos 7 dias para CCR com agregados naturais britados

Na Figura 6.3 são apresentados os resultados aos 28 dias. O trabalho de Balbo (1993) apresentou um incremento de resistência no período para a BGTC de 85%, devido aos motivos já comentados anteriormente. O trabalho de Diaz (1993) apresentou incrementos proporcionalmente menores de 52%, 34% e 10% para consumo de cimento de 80 kg/m³ e 38%, 32% e 21% para consumo de cimento de 120 kg/m³ para as granulometrias fina, média e grossa, respectivamente. Este fato não ocorreu no trabalho de Trichês (1993). O trabalho de Cho e Yeo (2004) apresentou aumento de resistência de 40% sendo que o presente trabalho apresentou incremento de 43%.

O resultado da resistência à compressão de 6,7 MPa para a Rodovia Castello Branco aos 28 dias representa a média de 2.208 corpo-de-prova cilíndricos rompidos durante a obra. O volume de 50.151,68 m³ de CCR aplicado na pista apresentou massa específica aparente seca máxima de 2.238 kg/m³ (média de 29 ensaios) e umidade ótima de 5,9% (média de 2.520 ensaios incluindo as determinações para o ensaio de compactação e controle de saída na usina), segundo a ABCP (2001).

Cabe destacar ainda que tanto para a idade de 7 dias como para 28 dias, os trabalhos de Diaz (1993) e Trichês (1993) apresentaram em comum, ganhos de resistência à medida que os traços apresentaram granulometrias mais grossas mantendo constante o consumo de cimento e a energia de compactação aplicada, porém aumentando o módulo de finura das misturas. Isto pode ser explicado pelo fato de que, de acordo com as composições granulométricas adotadas por Trichês (1993), as misturas mais grossas apresentaram um menor volume de vazios que as misturas mais finas, devido à maior presença de finos naqueles estudos. A absorção é uma propriedade que está intimamente ligada ao volume de vazios, quanto menor o volume de vazios, menor será a absorção do CCR. Com uma curva granulométrica bem distribuída e consumo de cimento semelhante à Trichês (1993) e Diaz (1993), no presente estudo foram atingidas resistências à compressão comparáveis. É de se supor uma distribuição granulométrica mal graduada para o CCR de Cho e Yeo (2004), pois para consumo de cimento maior chegaram a resultados inferiores.

Figura 6.3: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à compressão aos 28 dias para CCR com agregados naturais britados

Na Figura 6.4 são apresentados diversos resultados obtidos para resistência à compressão aos 7 dias para CCR utilizando agregados reciclados (RCD). Pode-se observar no trabalho de Cho e Yeo (2004) que a perda de resistência do CCR utilizando 100% de agregados miúdos reciclados em relação ao CCR utilizando 50% de agregados miúdos reciclados foi de 20% e em relação ao CCR com agregados naturais britados foi de 40%. No presente estudo, como descrito acima, isto não ocorreu por favorecimento do acréscimo de 14% de cimento no CCR1 e CCR4 -100% e 9% nos CCR3, CCR4.

Comparando-se o CCR de Cho e Yeo (2004) com 50% de agregados reciclados miúdos e o CCR1, CCR3 e CCR4 do presente estudo, também com a mesma porcentagem de agregados reciclados miúdos de RCD, verifica-se que as resistências à compressão foram maiores 27%, 42% e 40% respectivamente, no presente estudo, apesar de consumo de cimento 29% mais baixo. Comparando-se o CCR de Cho e Yeo (2004) com 100% de agregados reciclados miúdos e o CCR4 - 100% do presente estudo, tem-se praticamente o dobro de resistência à compressão com redução de consumo de cimento de 26%.

Figura 6.4: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à compressão aos 7 dias para CCR com agregados de RCD

Na Figura 6.5 são apresentados diversos resultados obtidos para resistência à compressão aos 28 dias para CCR com dosagem utilizando agregados reciclados de RCD. Os CCR de Cho e Yeo (2004) com 50% e 100% de agregados miúdos reciclados tiveram acréscimos de resistência à compressão no período de 7 para 28 dias de 88% e 82% sendo que o CCR1 (mais denso), CCR3 (intermediário), CCR4 (menos denso) e CCR4 - 100% tiveram 43%, 23%, 18% e 30%, respectivamente. Mesmo assim, os resultados de Cho e Yeo (2004) com consumo de cimento de 170 kg/m³ ficaram abaixo do presente estudo com consumo de 120 kg/m³, salvo o CCR1 e o CCR4 (100%) com consumo de 125 kg/m³.

As resistências finais dos CCR com 100% de agregados reciclados miúdos de Cho e Yeo (2004) resultaram 28% abaixo do CCR4 - 100% do presente estudo. O CCR4 (100%) que aos 7 dias tinha apresentado resistência à compressão ligeiramente inferior ao CCR3 e ao CCR4, aos 28 dias apresentou, juntamente com o CCR3, o maior resultado.

Destaque-se que as diferenças entre as resistências à compressão aos 28 dias para as 4 dosagens com agregados reciclados de RCD no presente estudo tiveram diferença máxima de 10% nos resultados obtidos, sendo portanto considerados equivalentes. Ressalta-se que, para o caso de dosagem com 100% de agregados reciclados, ao contrário do trabalho estrangeiro, na presente pesquisa não foi verificada queda importante no valor da resistência à compressão (com aumento de apenas 13% no consumo de cimento).

Figura 6.5: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à compressão aos 28 dias para CCR com agregados de RCD

6.3 Resistência à tração na flexão dos CCR

Na Tabela 6.2 são apresentados os resultados (média de 6 amostras) de resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias para os CCR estudados. Observa-se novamente maior ganho de resistência aos 7 dias quando do uso do RCD em substituição de 50% ou 100% dos agregados naturais, sendo que no caso da resistência à tração na flexão o CCR1 também apresentou aumento da resistência aos 7 dias. Isto pode ser entendido do ponto de vista de aumento de consumo de cimento (C) de todos os CCR com RCD em relação ao CCR* pois, nesse caso, a resistência medida é apreciavelmente afetada

pela interface pasta/agregado (BALBO, 1993), sendo que o aumento de 14% no consumo de ligante (caso do CCR1 e CCR4 100%) e de 9% nos demais casos, interferiu na resistência, que nesse caso seria menos dependente dos agregados.

Observe-se que as resistências finais encontradas para os CCR com RCD, com pequenos incrementos no consumo de cimento atingem valores similares ao CCR*, o que seria um indicador parcial da adequação do CCR com RCD para emprego em bases de pavimentos de concreto ou asfálticos, sem incrementos de custos importantes no que concerne aos consumos de cimento e com possível redução de custos pelo emprego do insumo RCD. Indicador parcial, pois nesse estudo não se avaliou o comportamento à fadiga dos concretos alternativos em relação ao CCR*, sendo que os pavimentos trabalham à fadiga nessas camadas resistentes à tração, o que impede afirmações categóricas sobre sua perfeita adequação.

Tabela 6.2: Resistência à tração na flexão dos CCR estudados

Resistência à tração na flexão (MPa)					
Idade (dias)	Agregados Naturais	Agregados Reciclados			
	CCR* (C=110 kg/m ³)	CCR1 (C=125 kg/m ³)	CCR3 (C=120 kg/m ³)	CCR4 (C=120 kg/m ³)	CCR4 - 100% (C=125 kg/m ³)
7	1,3	1,8	2,0	2,1	1,8
28	2,5	2,7	2,7	2,7	2,5

Na Figura 6.6 são apresentados diversos resultados obtidos para resistência à tração na flexão aos 7 dias para CCR utilizando agregados naturais britados. Pode-se observar tanto nos resultados de Diaz (1993) como no de Trichês (1993), um ganho de resistência do CCR com granulometria fina (F) para média (M) e da média para a grossa (G), com diâmetro máximo de agregados de 25 mm e mesmo consumo de cimento. As resistências à tração na flexão com alteração de consumo de cimento de 80 kg/m³ para 120 kg/m³ praticamente dobram de valores. Cho e Yeo (2004) obtiveram resultado de 2,6 MPa para a resistência à tração na flexão com consumo de cimento de 170

kg/m³. Balbo (1993) obteve resistência 0,5 MPa para a BGTC com as mesmas características do resultado obtido na resistência à compressão. No presente estudo, a resistência obtida foi de 1,3 MPa para consumo de cimento de 110 kg/m³, podendo ser comparada com o resultado obtido por Diaz (1993) para granulometria grossa e Trichês (1993) para granulometria média, ambos com consumo de 120 kg/m³.

Figura 6.6: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à tração na flexão aos 7 dias para CCR com agregados naturais britados

Na Figura 6.7 são apresentados os resultados da resistência à tração na flexão aos 28 dias para CCR utilizando agregados naturais britados. O estudo de Balbo (1993) apresentou um incremento de resistência no período para a BGTC de 86%. O estudo de Diaz (1993) apresentou incrementos de resistência (18%, 25% e 13% para consumo de cimento de 80 kg/m³ e 14%, 46% e 26% para consumo de cimento de 120 kg/m³) para as granulometrias fina, média e grossa, respectivamente. O estudo de Trichês (1993) apresentou incrementos de resistência (33%, 50% e 46% para consumo de cimento de 80 kg/m³ e 17%, 25% e 13% para consumo de cimento de 120 kg/m³) para as granulometrias fina, média e grossa, respectivamente. O CCR estudado por Cho e Yeo (2004)

apresentou ganho de resistência de 12% sendo que, no presente estudo, o CCR* apresentou incremento de 92%, atingindo a resistência à tração na flexão de 2,5 MPa.

Cabe destacar ainda que tanto para a idade de 7 dias como para 28 dias, os trabalhos de Diaz (1993) e Trichês (1993) apresentaram em comum, resistências à tração na flexão maiores na medida em que os traços apresentaram granulometrias mais grossas mantendo constante o consumo de cimento e a energia de compactação, fato já verificado nos resultados da resistência à compressão.

Figura 6.7: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à tração na flexão aos 28 dias para CCR com agregados naturais britados

Na Figura 6.8 são apresentados diversos resultados obtidos para resistência à tração na flexão aos 7 dias para CCR utilizando agregados reciclados de RCD. Pode-se observar no trabalho de Cho e Yeo (2004) que a perda de resistência

do CCR utilizando 100% de agregados miúdos reciclados em relação ao CCR utilizando 50% de agregados miúdos reciclados foi de 10% e, em relação ao CCR com agregados naturais britados, foi de 22%, diferenças percentuais menores que aquelas obtidas para a resistência à compressão. Os motivos apontados por Cho e Yeo (2004) foram as dificuldades encontradas no controle de qualidade causado pela maior absorção de água e a aderência na interface argamassa-agregado.

Comparando-se o CCR de Cho e Yeo (2004) com o CCR1, CCR3 e CCR4 do presente estudo, todos com a mesma porcentagem de 50% de agregados reciclados miúdos de RCD, as resistências à tração na flexão do presente estudo foram menores 18%, 9% e 5% respectivamente, recordando que o consumo de cimento foi 29% inferior. Para o CCR de Cho e Yeo (2004) com 100% de agregados reciclados miúdos, o CCR4 - 100% do presente estudo apresenta resistência à tração na flexão 10% inferior, para consumo de cimento inferior em 26%. As diferenças encontradas foram, de fato, pequenas.

Figura 6.8: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à tração na flexão aos 7 dias para CCR com agregados de RCD

Na Figura 6.9 são apresentados diversos resultados obtidos para resistência à tração na flexão aos 28 dias para CCR utilizando agregados reciclados de RCD. Os CCR de Cho e Yeo (2004) com 50% e 100% de agregados miúdos reciclados tiveram acréscimos de resistência à compressão no período de 7 para 28 dias de 23% e 15% sendo que o CCR1 (mais denso), CCR3 (intermediário), CCR4 (menos denso) e CCR4 (100%) tiveram 50%, 35%, 29% e 39% respectivamente. As resistências finais de Cho e Yeo (2004) com consumo de cimento de 170 kg/m³ e o CCR1, CCR3 e o CCR4 do presente estudo com consumo de 120 kg/m³, salvo o CCR1 com 125 kg/m³, foram idênticas.

As resistências finais dos CCR com 100% de agregados reciclados miúdos de Cho e Yeo (2004) resultaram 8% abaixo do CCR4 (100%) do presente estudo. O CCR4 (100%) que aos 7 dias tinha apresentado a mesma resistência à tração na flexão do CCR1 e ligeiramente superior ao CCR3 e ao CCR4, aos 28 dias apresentou resistência 7% inferior àquelas dosagens.

Figura 6.9: Resultados de diversos trabalhos para a resistência à tração na flexão aos 28 dias para CCR com agregados de RCD

6.4 Módulo de elasticidade dos CCR

Na Tabela 6.3 são apresentados todos os resultados de módulo de elasticidade em compressão, aos 28 dias, para os concretos estudados, determinados com base nos valores de deformação específica a 30% (módulo tangente) e 70% (módulo secante) da tensão de ruptura das amostras, sendo apresentados os valores individuais. Todas as dosagens de CCR estudadas tiveram moldados três corpos-de-prova (CP), exceto o CCR4. O corpo-de-prova 2 (CP 2) relativo ao CCR4 rompeu durante o ensaio sendo seu resultado descartado do estudo. Nos ensaios de laboratório notou-se, após as leituras e registros manuais de deformações com relógios comparadores digitais, imprecisão em algumas leituras de deformação, o que causou variabilidade indesejável para uma discussão mais acertada dos resultados. Em função dessa circunstância decidiu-se posteriormente pela elaboração de ensaios de módulo de elasticidade por propagação de onda ultra-sônica, medidos com grande precisão.

Tabela 6.3: Módulo de elasticidade dos CCR estudados

CCR	CP	$\sigma_{30\%}$ (MPa)	$\sigma_{70\%}$ (MPa)	$\epsilon_{0,5}$ (m/m)	$\epsilon_{30\%}$ (mm/mm)x10 ⁶	$\epsilon_{70\%}$ (mm/mm)x10 ⁶	E _t (MPa)	E _s (MPa)	Média E _t (MPa)	Média E _s (MPa)
CCR*	1	3,6	8,4	0	147	800	21.088	9.875	21.770	10.355
	2	3,6	8,4	3	137	600	23.134	13.233		
	3	3,6	8,4	0	147	993	21.088	7.956		
CCR1	1	3,5	8,1	0	195	1250	15.385	6.080	15.534	7.526
	2	3,5	8,1	0	200	890	15.000	8.539		
	3	3,5	8,1	0	185	955	16.216	7.958		
CCR3	1	3,5	8,2	0	200	710	15.000	10.845	17.512	11.606
	2	3,5	8,2	0	155	635	19.355	12.126		
	3	3,5	8,2	0	165	650	18.182	11.846		
CCR4	1	3,7	8,6	0	150	620	21.333	13.065	18.472	10.503
	(corpo-de-prova danificado durante o ensaio)									
	3	3,7	8,6	0	205	1020	15.610	7.941		
CCR4(100%)	1	3,9	9,0	0	215	685	15.814	12.409	16.866	10.587
	2	3,9	9,0	0	170	755	20.000	11.258		
	3	3,9	9,0	0	230	1050	14.783	8.095		

Na Figura 6.10 são apresentados diversos resultados obtidos para o módulo de elasticidade aos 28 dias para CCR utilizando agregados britados naturais. O que se pode extrair dos valores obtidos é que o CCR* apresentou, na maioria dos casos, valores de módulo de elasticidade estático tangente em compressão superiores aos demais, sendo 21.770 MPa um número representativo para ele.

No caso do módulo de elasticidade secante há maior proximidade entre valores individuais obtidos. Os valores encontrados são bastante consistentes com aqueles determinados por Balbo (1993) para a brita graduada tratada com cimento, com consumo de cimento de 75 kg/m^3 , usadas em bases de pavimentos, que no caso atingiam valores elevados também em função de sua rigorosa distribuição granulométrica e no emprego da energia modificada. A grande vantagem dos CCR estudados sobre a BGTC consiste em sua resistência quase três vezes superior, já que, como camada de pavimento, tendo ambos os mesmos módulos de elasticidade, as tensões devidas a cargas idênticas seriam também idênticas.

O CCR com consumo de cimento 170 kg/m^3 estudado por Cho e Yeo (2004) apresentou módulo de elasticidade dinâmico 10% superior ao do CCR* com consumo 110 kg/m^3 do presente estudo (dinâmico). O módulo de elasticidade tangente do presente estudo apresentou resultado 20% superior ao de Trichês (1993) com granulometria grossa e consumo de cimento de 120 kg/m^3 e de Diaz (1993) com granulometria média e mesmo consumo de cimento. Para o módulo de elasticidade secante do presente estudo o resultado obtido praticamente é o mesmo ao de Trichês (1993) com granulometria grossa e consumo de cimento de 80 kg/m^3 .

No presente estudo, o módulo de elasticidade dinâmico resultou 41% superior ao módulo de elasticidade tangente e 196% superior ao módulo de elasticidade secante. O módulo de elasticidade tangente resultou praticamente o dobro do módulo de elasticidade secante. Trichês (1993) observa que o consumo de cimento é a variável mais importante na definição do valor do módulo de elasticidade. Diaz (1993) observa que para consumos inferiores a 120 kg/m^3 , o

módulo de elasticidade pode aumentar até 34% alterando-se a energia de compactação de normal para intermediária e até 83% da normal à modificada. De fato, foi isso que permitiu que Balbo (1993) encontrasse valores elevados para a BGTC. Ambos mostraram ainda a importância da granulometria (fina, média e grossa) na influência dos resultados obtidos.

Figura 6.10: Resultados de diversos autores para o módulo de elasticidade aos 28 dias para CCR com agregados naturais britados

Na Figura 6.11 são apresentados diversos resultados obtidos para o módulo de elasticidade aos 28 dias para CCR utilizando agregados reciclados de RCD. Observa-se que os resultados de módulo de elasticidade dinâmico de Cho e Yeo (2004) acarretaram em perda de 10% do CCR com 50% de agregados reciclados miúdos para o CCR com 100%. Em relação ao CCR com agregados naturais britados, as perdas foram de 8% e 17% respectivamente. Igualmente no presente trabalho, as perdas dos valores do CCR1 (mais denso) para o CCR 3 (intermediário), CCR 4 (menos denso) e o CCR4 - 100% referentes ao módulo de elasticidade dinâmico foram de 23%, 21% e 50% respectivamente.

Em relação ao CCR com agregados naturais britados, as perdas foram de 17%, 33%, 32% e 45% respectivamente. Os resultados de Cho e Yeo (2004) utilizando 50% de agregados miúdos reciclados de concreto e consumo de

cimento de 170 kg/m³ foram 13%, 30% e 29% superiores ao CCR1 com consumo de cimento 125 kg/m³, CCR3 e CCR4 com consumo de cimento de 120 kg/m³ respectivamente. O resultado de Cho e Yeo (2004) utilizando 100% de agregados miúdos reciclados de concreto e consumo de cimento de 170 kg/m³ foi 58%, superior ao CCR4 (100%) com consumo de cimento 125 kg/m³.

Figura 6.11: Resultados de diversos autores para o módulo de elasticidade aos 28 dias para CCR com agregados de RCD

Na Figura 6.12 são apresentados somente os resultados obtidos para o módulo de elasticidade por propagação de onda ultra-sônica aos 28 dias para CCR utilizando agregados naturais britados (CCR*) e agregados reciclados de RCD (CCR1, CCR3, CCR4 e CCR4 – 100%). Verifica-se que todos os valores de módulo elástico por propagação de onda ultra-sônica obtidos para CCR utilizando agregados reciclados, foram inferiores em relação ao CCR utilizando agregados naturais britados. As quedas dos módulos de elasticidade foram maiores quanto menor a densidade do CCR estudado. A maior perda de valor ocorreu para o CCR 4 (100%), sendo praticamente a metade do CCR utilizando agregados naturais britados.

Figura 6.12: Resultados dos módulos de elasticidade por propagação de onda ultra-sônica aos 28 dias do presente trabalho

Observa-se que o módulo de elasticidade diminui do CCR mais denso para o CCR com densidade menor, enquanto a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão sofreram pequena variação de valores, sendo os mesmos em alguns casos, porém, com consumos de cimento diferentes.

6.5 Modificações granulométricas do CCR

Na Tabela 6.4 são apresentados todos os resultados relativos à variação do índice de degradação (ID) por etapas e a variação total para o CCR com cada tipo de agregado utilizado, considerando as variações verificadas nas curvas granulométricas após cada etapa. Determinou-se a variação granulométrica após a execução da mistura na betoneira em laboratório (coluna ID dosagem e após betoneira da Tabela 6.4) comparando com a situação de obra onde os materiais são manuseados desde a fase de depósito em canteiro até a execução de dosagem e mistura em caminhões betoneira. A etapa final (coluna ID após betoneira e após compactação da Tabela 6.4), ou seja, da execução

da mistura em betoneira até a compactação em laboratório, simula a situação de obra do CCR após a compactação com rolos compactadores.

Dos resultados verifica-se que parte da quebra dos grãos do material acontece na primeira fase, sendo que quando o CCR chega à fase de compactação, a granulometria da mistura já está parcialmente modificada contribuindo para uma menor quantidade de vazios e, conseqüentemente, uma densificação maior, favorecendo seu comportamento como material de pavimentação. Esta nova situação física do CCR contribui favoravelmente para as propriedades mecânicas do material.

Pode-se constatar para o CCR com agregados naturais, que 80% do índice de degradação total ocorreu na primeira fase, situação semelhante ao CCR4 e CCR4 (100%). Para o CCR1 e o CCR3 o ID, na primeira fase, representou aproximadamente 45% do índice de degradação total (ID dosagem até após compactação). Apesar do ID total do CCR1, CCR4 e CCR4 (100%) resultarem o dobro do CCR* e CCR3, pode-se afirmar que os valores encontrados não foram elevados, se comparados a valores anteriormente obtidos por Leite (2005) – entre 2,64% e 3,18% para RCD - e Valle (1994) - 3,6% -, neste último caso para solos residuais de granito (saprólito).

Tabela 6.4: Índices de degradação (ID - % de variação por peneira) de cada etapa dos CCR estudados (%)

Tipo de CCR	ID dosagem até após betoneira	ID após betoneira até após compactação	ID dosagem até após compactação
CCR*	1,997	0,512	2,509
CCR1	2,346	2,828	5,174
CCR3	1,114	1,347	2,461
CCR4	3,502	1,587	5,089
CCR4 (100%)	4,134	1,190	5,324

Na Tabela 6.5 são apresentados os valores dos coeficientes de uniformidade relativos igualmente a cada etapa para cada tipo de CCR estudado. Pode-se observar que praticamente o aumento do coeficiente de uniformidade de todos os tipos de CCR ocorreu na primeira etapa, ou seja, no manuseio e mistura do

CCR em betoneira. Nesta etapa, o CCR passou a ter uma graduação melhor distribuída, com possíveis ganhos na densificação e no seu comportamento mecânico. Pode-se observar que para o CCR*, CCR1 e o CCR4, os valores após a execução da mistura na betoneira dobraram e praticamente mantiveram seus valores após a etapa de compactação, exceto o CCR1 que teve queda de 12%. O CCR3 apresentou variação maior na conclusão da segunda fase resultando um acréscimo de 25%. O CCR4 - 100% resultou em acréscimo de 50% no final da primeira fase.

Evidente que a situação física de um mesmo CCR pode apresentar modificações granulométricas diferentes de acordo com a espessura da camada, pois massas diferentes submetidas a uma mesma quantidade de energia resultarão em modificações granulométricas diferentes como também o índice de vazios e suas propriedades mecânicas.

Tabela 6.5: Coeficientes de uniformidade de cada etapa dos CCR estudados

Tipo de CCR	CU na dosagem	CU após betoneira	CU após compactação
CCR*	23,67	45,27	43,78
CCR1	27,40	54,19	47,37
CCR3	43,64	44,37	54,09
CCR4	25,48	52,23	54,78
CCR4 (100%)	30,19	45,40	45,22

6.5 Porosidade dos CCR

Na Tabela 6.12 são apresentados os resultados de porosidade para cada corpo-de-prova estudado e a média obtida para cada tipo de CCR. Pode-se verificar que o CCR* com agregados naturais tem porosidade inferior aos CCR com agregados reciclados. Verifica-se ainda que o CCR4 - 100% apresentou maior porosidade, sendo 65% superior ao CCR*.

Tabela 6.6: Porosidade dos CCR estudados

Tipo de CCR	CP	Porosidade (%)	Média (%)
CCR*	1	11,30	11,15
	2	11,00	
CCR1	3	14,90	14,45
	4	14,00	
CCR3	5	16,80	17,05
	6	17,30	
CCR4	7	15,50	15,40
	8	15,30	
CCR4 (100%)	9	18,50	18,45
	10	18,40	

Na Figura 6.13 são apresentados resultados de porosidade de diversos estudos de CCR com agregados naturais. Diaz (1993) e Trichês (1993) observaram uma diminuição da porosidade do CCR com uma granulometria fina para a mais grossa devido a uma melhor distribuição dos grãos. O presente estudo apresentou a menor porosidade dentre os diversos estudos para agregados naturais, sendo 15% inferior ao CCR estudado por Trichês (1993) com granulometria grossa e consumo de cimento de 120 kg/m³.

Figura 6.13: Resultados de diversos estudos para a porosidade do CCR com agregados naturais britados

Na Figura 6.14 são apresentados resultados de porosidade de diversos estudos de CCR com agregados reciclados de RCD. Para os CCR1, CCR3 e CCR4, todos com agregados graúdos (100% reciclados) e 50% de agregados miúdos reciclados, a porosidade variou em 20% do CCR1 para o CCR3 e em 7% para o CCR4. Para o CCR4 - 100% com agregados graúdos e miúdos reciclados em 100%, variou em 18%.

Figura 6.14: Resultados do presente estudo para a porosidade do CCR com agregados reciclados de RCD

6.7 Absorção de água dos CCR

Na Figura 6.15 são apresentados resultados de absorção dos diversos estudos de CCR com agregados naturais britados. É uma propriedade que está muito relacionada com a porosidade. Comparando-se os resultados apresentados na Figura 6.14 e Figura 6.15 verifica-se que quanto menor este valor, menor será a absorção do CCR.

Figura 6.15: Resultados de diversos estudos para a absorção do CCR com agregados naturais britados

Na Figura 6.16 são apresentados resultados de absorção do presente estudo de CCR com agregados reciclados de RCD. Pode-se verificar que as absorções dos CCR1, CCR3, CCR4 e CCR4 – 100% foram 42%, 67%, 50% e 88% superiores ao do CCR*, respectivamente. Pode-se observar também que os valores obtidos para a absorção e porosidade no CCR1 são muito próximos aos obtidos por Diaz (1993) e Trichês (1993) para o CCR (G) 120 kg/m³.

Figura 6.16: Resultados do presente estudo, para a absorção do CCR com agregados reciclados de RCD.

Como se pode observar na Tabela 6.7 e 6.8, a absorção de água dos concretos, medida através dos poros acessíveis à água, está correlacionada com a massa específica aparente dos agregados graúdos de RCD, por ser uma variável dependente do volume de vazios, para as diferentes umidades ou consumos de cimento (Angulo, 2005). A porosidade da argamassa aderida nos agregados reciclados influencia nas propriedades mecânicas do concreto (Angulo *et al*, 2003).

Tabela 6.7: Massa específica aparente seca máxima, absorção, porosidade e umidade dos CCR

	MEAS (g/cm³)	Absorção (%)	Porosidade (%)	Umidade Ótima (%)
CCR*	2,425	4,8	11,2	6,0
CCR1	2,305	6,8	14,4	8,4
CCR3	2,257	8,0	17,1	8,8
CCR4	2,210	7,2	15,4	8,9
CCR4 (100%)	2,136	9,0	18,4	10,0

Tabela 6.8: Massa específica aparente seca e absorção dos agregados utilizados nos CCR

Tipo de concreto	Agregados	MEAS (g/cm³)	Absorção (%)
CCR*	Areia	2,61	1,26
	Brita 0	2,65	1,33
	Brita 1	2,65	0,90
	Brita 2	2,69	0,60
CCR1	Areia	2,61	1,26
	Brita 0	2,54	3,62
	Brita	2,55	4,60
CCR3	Areia	2,61	1,26
	Brita 0	2,50	5,02
	Brita	2,43	6,00
CCR4	Areia	2,61	1,26
	Brita 0	2,47	5,97
	Brita	2,29	9,50
CCR4 (100%)	Areia	2,61	1,26
	Brita 0	2,29	10,60
	Brita	2,29	9,50

A absorção observada nos grãos dos agregados reciclados é expressivamente maior que aquela de agregados naturais, o que justifica parcialmente a necessidade de maior quantidade de água para a compactação dos CCR com

agregados de RCD que no caso de agregados naturais britados. Também, os agregados reciclados de RCD apresentam densidades inferiores aos agregados naturais, o que redundará em CCR (com agregados de RCD) com pesos específicos ligeiramente inferiores ao CCR com agregados naturais. A Tabela 6.8 confirma esta correlação, principalmente para os agregados graúdos, ou seja, quanto menor a densidade dos grãos, maior será a absorção de água.

A alta absorção dos agregados reciclados exerce grande influência na produção dos concretos (Carrijo, 2005). Além da água de amassamento necessária à hidratação do cimento, deve-se considerar a água a ser absorvida pelos agregados reciclados utilizados na dosagem. Isto evitará problemas relativos à consistência do CCR como a perda repentina de umidade do CCR e das propriedades mecânicas propriamente ditas. Isto pode ser verificado através das diferenças obtidas na umidade ótima dos CCR do presente estudo (Tabela 6.7).

A maior absorção por capilaridade nos concretos de RCD (Tabela 6.9) indica a maior formação de capilares, estruturas formadas pela saída de água para o ambiente, que é justificada pelo maior teor de umidade nos concretos com RCD.

Tabela 6.9: Absorção por capilaridade dos CCR do presente estudo

Concretos	Absorção por capilaridade (g/cm²)
CCR*	1,00
CCR1	1,55
CCR3	1,70
CCR4	1,50
CCR4 (100%)	1,70

6.8 Discussão dos resultados

Para alguns autores, entre eles Alaejos *et al* (2004), um concreto plástico convencional com resistência à compressão de 25 MPa a 50 MPa pode perder até 30% da resistência quando tem seus agregados naturais britados substituídos 100% por agregados reciclados de RCD. Faz-se necessário um consumo de cimento maior para que os concretos com agregados reciclados de RCD atinjam uma determinada resistência, sendo que este aumento de consumo pode variar de 7% a 17%. Para o CCR4 - 100% estudado, verificou-se um acréscimo de consumo de cimento de 14%, mantida a mesma energia de compactação, confirmando esta expectativa. Para substituições de até 50% dos agregados naturais, a perda de resistência é de 5% a 10%. OS CCR1, CCR3 e o CCR4 tiveram acréscimo de 9% no consumo de cimento. Todas as misturas atingiram a resistência desejada.

Para umidades baixas, a resistência à compressão para concretos com agregados reciclados de RCD é limitada pela resistência mais baixa do agregado reciclado. Neste caso, a pasta é mais resistente e a resistência do concreto com agregados naturais britados é mais elevada que a dos concretos reciclados. Conforme o aumento da umidade ótima de compactação exigida no caso de emprego de agregados reciclados, valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados aumentam, podendo ser superiores àqueles do concreto com agregados naturais britados (CARRIJO, 2005), principalmente em concretos onde não ocorreu uma compensação da água de absorção dos agregados reciclados de RCD na água de amassamento da mistura.

Verificou-se ainda que a quebra dos grãos do material, que numa primeira análise poderia parecer prejudicial, resultou numa granulometria final da mistura mais distribuída, contribuindo para uma menor quantidade de vazios e, consequentemente, uma densificação maior, melhorando os resultados relativos às propriedades mecânicas. Das curvas granulométricas dos CCR estudados, pode-se observar que o CCR4 – 100% foi o que melhor “se

encaixou” na faixa granulométrica adotada, contribuindo favoravelmente nos resultados obtidos.

Observou-se que os valores de resistência à compressão nos CCR reciclados foram semelhantes, aos 28 dias, ao CCR*, mas que essas resistências melhoraram quanto tomados 7 dias de referência. Esse aumento de resistência não aparentou ser consequência exclusiva do aumento no consumo de cimento nos CCR reciclados posto que, para semelhantes consumos de cimento, os CCR com agregados reciclados de menor densidade apresentaram ganhos melhores aos 7 dias. Contudo, a resistência à compressão pouco tem a dizer sobre o possível desempenho do material como camada de pavimento, pois o mesmo trabalha em flexão, no caso.

A resistência à tração na flexão é um importante indicador, no caso, da viabilidade do emprego do material em camadas de pavimentos. Neste caso, houve aumento expressivo na resistência dos CCR reciclados aos 7 dias, embora aos 28 dias tenham as mesmas mantido-se praticamente idênticas ao CCR*. Deve ser considerado que, para se atingir tais resultados, pequeno foi o acréscimo do consumo de cimento na mistura (aproximadamente 9%). Isto, sim, justifica tecnicamente o emprego do CCR reciclado em camadas de base de pavimentos, por exemplo, embora seja apenas uma afirmação parcial, pois se tratando de medida de resistência estática e não dinâmica, não pode traduzir muito a respeito do comportamento à fadiga do material, que é de fundamental conhecimento para o projeto de pavimentos, definindo as espessuras de camadas de CCR viáveis para determinada estrutura de pavimento e determinado tráfego de projeto. Outro aspecto que interfere com o comportamento e desempenho dos CCR em pavimentos é o módulo de elasticidade do material.

Segundo Alaejos *et al* (2004), um concreto plástico convencional pode perder até 40% do valor do módulo de elasticidade quando tem seus agregados naturais britados substituídos 100% por agregados reciclados de RCD. Para o CCR4 (100%) estudado, verificou-se uma perda do valor do módulo de elasticidade dinâmico em relação ao CCR* de 45%, confirmando esta

expectativa. Para concretos com 50% dos agregados naturais britados substituídos por agregados reciclados, a redução do módulo de elasticidade é de cerca de 20%. Esta condição foi verificada para o CCR1 sendo que a redução para o CCR3 e CCR4 foi de aproximadamente 32%.

Para concretos com agregados reciclados de concreto e argamassa, a redução do módulo de elasticidade se deve à camada de argamassa antiga aderida ao agregado original e à maior porosidade dos agregados reciclados (LEVY, 1997). Para agregados reciclados de origem cerâmica, a redução do módulo está relacionada com a porosidade dos agregados. Quanto menos densos são os agregados constituintes do concreto, maior será a redução do módulo de elasticidade. Consequentemente, como já comentado, o valor do módulo de elasticidade sofre uma redução à medida que o concreto apresenta valores menores de massa específica aparente seca.

A Figura 6.17 confirma esta correlação entre a porosidade do concreto e a redução do módulo de elasticidade dos CCR estudados. Verifica-se que o CCR4 (100%) apresenta 55% do valor do módulo de elasticidade do CCR* e acréscimo de 65% em relação à sua porosidade.

Figura 6.17: Correlação entre a porosidade e o módulo de elasticidade dinâmica dos CCR estudados

A Figura 6.18 apresenta a correlação entre a massa específica aparente seca e o módulo de elasticidade dos CCR estudados. Verifica-se que a massa específica do CCR4 (100%) é 12% inferior ao CCR* porém a variação entre os valores de módulo de elasticidade, no caso, foi de 55%, ou seja, pequena queda na massa específica resultou em grande redução no valor do módulo de elasticidade. Note que o coeficiente de determinação das correlações é muito elevado em ambos os casos.

Figura 6.18: Correlação entre massa específica aparente seca e o módulo de elasticidade dinâmica dos CCR estudados

Na Figura 6.19 observa-se claramente a relação existente entre a porosidade e a massa específica aparente seca dos CCR reciclados estudados. Quanto menor a massa específica aparente seca do CCR, maior será a sua porosidade e a absorção de água.

Figura 6.19: Correlação entre massa específica aparente seca e a porosidade dos CCR estudados

Devido ao rompimento de um corpo-de-prova durante a execução do ensaio para obtenção do módulo de elasticidade estático e à imprecisão de leituras, conforme já mencionado, os resultados apresentaram grande variabilidade comprometendo as análises que deles se poderia fazer. Devido a este fato, optou-se pela realização posterior da determinação do módulo de elasticidade dinâmico (também chamado ultra-sônico). Na Figura 6.20 mostra a dispersão dos resultados devido à variabilidade das respostas de módulo de elasticidade estático quando correlacionado com o módulo de elasticidade dinâmico. Assim, os valores de módulo de elasticidade estáticos obtidos podem ser entendidos apenas como indicadores da queda de valores em função do emprego de RCD no CCR, não sendo, contudo, valores muito confiáveis, na maneira como aferidos, para projeto de pavimentos.

Figura 6.20: Correlação entre o módulo de elasticidade estático com o módulo de elasticidade dinâmico dos CCR estudados

Na Figura 6.21 é apresentada uma tentativa de correlação entre os valores de módulo de elasticidade dinâmico e os valores de resistência à compressão obtida para os corpos-de-prova, que resultou muito próxima para todos os CCR, não permitindo resultado importante ou significativo. Tem-se que, o aumento do consumo de RCD (na brita 0, de 50% para 100%) no CCR causou a queda no valor do módulo de elasticidade.

Figura 6.21: Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 6.22 é esboçada a correlação entre os valores de módulo de elasticidade dinâmico e as resistências à tração na flexão dos CCR. Observa-se que há um ganho de resistência à tração com o emprego do RCD até certo ponto, sendo que com 100% de RCD no CCR (CCR4 - 100%) a resistência volta a ser idêntica ao CCR*. Todavia, na medida em que o RCD é mais cerâmico (menos denso) e seu consumo aumenta, fica evidente uma grande queda no valor do módulo de elasticidade. Isto tem implicações importantes para o projeto de pavimentos empregando o CCR com RCD como base.

Figura 6.22: Correlação entre a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade dinâmica dos CCR estudados

Este comportamento dos CRR estudados quanto ao módulo de elasticidade possui importantes impactos na avaliação técnica do material estudado, sendo que uma breve discussão poderá enfocar melhor o problema, bem como a potencialidade do emprego do CCR com RCD em pavimentos.

As camadas cimentadas em estruturas de pavimentos trabalham em flexão sob a ação de cargas externas, sendo que assim ficam solicitadas por esforços de tração na flexão, notavelmente em suas fibras inferiores. O fato de uma camada cimentada apresentar menor módulo de elasticidade tem conseqüências, em especial quando empregada como base de pavimentos semi-rígidos ou rígido-híbridos (BALBO, 2005). Imaginando-se um sistema de três camadas, por simplicidade, no qual sejam mantidas as espessuras das camadas, a carga aplicada externamente e os módulos de elasticidade do revestimento (mistura asfáltica densa) e do subleito, tolerando-se variações no módulo de elasticidade da base, é de se esperar que, na medida em que o módulo de resiliência da base diminui, as tensões de tração na flexão no elemento também diminuam. Este fato é ilustrado com base em análises realizadas para os valores de módulo de elasticidade da base em CCR conforme apresentados na presente pesquisa. Na Tabela 6.10 são apresentadas três situações para análise de tensões e deformações com base na Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (BALBO, 2007), simuladas com o programa ELSYM5, para o eixo padrão de 80 kN com pressão nos pneumáticos de 0,64 MPa.

Tabela 6.10: Simulação de deformações e tensões para pavimentos rígido-híbridos com o ELSYM5

Parâmetro	Revestimento	Base				Subleito
Tipo de material	SMA	CCR*	CCR1	CCR3 ou CCR4	CCR4 (100%)	NS'
E (N/mm ²)	6.000	30.000	25.000	21.000	17.000	50
Poisson	0,35	0,15	0,15	0,15	0,15	0,49
Espessura (mm)	50	150	150	150	150	-
σ_{tt}^{base} (MPa)	-	1,37	1,30	1,23	1,15	-
$\sigma_v^{subleito}$ (MPa)	-	-0,013	-0,014	-0,015	-0,016	-
$\delta_{superfície}$ (0,01 mm)	-	33,4	34,6	35,7	37,1	-

Observe-se que para uma variação do módulo do CCR entre 30.000 MPa (CCR*) e 17.000 MPa (CCR4 -100%) a tensão de tração na flexão foi reduzida de 1,37 para 1,15 MPa. Respectivamente, tais tensões acarretam valores de relações entre tensões (tensão aplicada dividida pela resistência à tração na flexão) de 0,55 e de 0,46. Do ponto de vista de durabilidade à fadiga, os resultados seriam assim, a princípio, mais favoráveis ao emprego do CCR4 - 100%, como consequência de apresentar módulo de elasticidade bem inferior, porém mesma resistência à tração na flexão.

A hipótese acima, embora possível de especulação, deverá ser comprovada por meio de estudos futuros envolvendo testes de fadiga nos CCR com agregados reciclados de RCD, pois há que se considerar também que, com agregados mais frágeis há possibilidades de um comportamento à fadiga menos satisfatório do material, quando a ruptura não passaria a depender apenas das ligações na interface pasta-agregado, mas também da resistência do próprio agregado. Portanto, as especulações, embora típicas de ambientes de projeto, indicadas no parágrafo anterior, podem ficar seriamente comprometidas.

Reforçando tal argumento tem que ser recordado que o CCR com menor módulo de elasticidade foi consequentemente o CCR que se apresentou mais poroso, com maior índice de vazios. Isto tem implicações importantes no comportamento à fratura do material, pois, é sabido que o processo de fratura e propagação de fissuras (até a fadiga) é muito dependente dos vazios preexistentes no material, que se trata de imperfeições na matéria. Quanto maior a presença de fissuras ou vazios iniciais, maior a probabilidade de fratura mais precoce. Assim sendo, reforça-se aqui a imperiosa necessidade de estudos sistemáticos de comportamento à fadiga dos CCR com RCD evitando-se estabelecer, nesse caso, conclusões prematuras.

Por outro lado, o CCR é um concreto que oferece grande versatilidade em seu emprego, por exemplo, com aumento de energia de compactação e simultânea redução da umidade de dosagem da mistura, parâmetros de dosagem que implicam na redução da porosidade da mistura, bem como ganho na massa

específica aparente seca além mesmo de maior quebra de grãos e empacotamento da mistura (maior esforço de compactação), resultando assim em possíveis melhorias significativas de suas propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e resistência.

7 CONCLUSÕES

O principal objetivo desse trabalho consistiu na análise laboratorial das propriedades mecânicas básicas do concreto compactado com rolo (CCR) utilizando-se agregado reciclado de construção e demolição (RCD), comparando-as com o concreto compactado com rolo executado convencionalmente com agregado natural britado, importantes para uso como base de pavimentos. Os estudos envolveram a determinação de resistências à compressão e à tração na flexão, de módulo de elasticidade estático e dinâmico, além de ensaios triviais de massa específica do material compactado, de porosidade e de absorção.

Recorda-se que, para a seleção dos agregados para os estudos foi empregado o critério de separação densitária, sendo que os CCR estudados também passaram posteriormente por testes de granulometria em diversas fases para verificação de suas modificações. Com base nos estudos realizados com os CCR elaborados com agregados reciclados de RCD, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

1. As resistências à compressão e à tração na flexão dos CCR empregando 100% de agregado graúdo reciclado e 50% de pedrisco reciclado, foram bastante próximas às resistências de um CCR com agregados naturais britados (granito) à custa de pequeno incremento de aproximadamente 9% de cimento Portland (CPIII-40).
2. Em todos os casos foi necessário acréscimo de teor de umidade nas misturas com agregados reciclados como consequência da maior porosidade presente em todos os tipos de agregados reciclados de RCD empregados nos estudos.
3. Ao se empregar 100% de reciclados de RCD em todas as frações excluída a areia não foram obtidas diferenças importantes, fossem de dosagem, fossem de resistências obtidas.

4. Os testes de degradação dos materiais mostraram que na fase de manuseio até conclusão da dosagem e mistura é a fase em que ocorre maior quantidade de quebras de grãos. Entretanto, os índices de degradação verificados para os agregados reciclados de RCD nesse estudo não se mostraram piores ou muito piores que valores encontrados para outros estudos já realizados, inclusive para agregados naturais britados.
5. Os coeficientes de uniformidade obtidos antes da compactação dos materiais reciclados indicaram melhoria das distribuições granulométricas dos concretos.
6. A porosidade e a absorção dos CCR estudados aumentaram de modo consistente com o aumento da quantidade de agregados reciclados de RCD nas misturas bem como em função da diminuição da densidade dos grãos dos agregados (que decresce quanto maior a quantidade de agregados cerâmicos).
7. Os valores de módulo de elasticidade medidos, em especial dinâmicos, foram capazes de denotar a estrita relação com a porosidade e com a massa específica dos CCR estudados. Houve queda expressiva no valor do módulo de elasticidade entre as misturas de CCR com agregados naturais e com agregados reciclados (excluindo parte da areia), de 31 GPa para 17 GPa.
8. Uma possível vantagem estudada do comportamento modular dos CCR com agregados reciclados de RCD seria para o caso de pavimentos e pisos em que não fossem prioritárias as cargas repetitivas, pois nesse caso, ter-se-ia módulo de elasticidade inferior combinado com elevada resistência à tração na flexão, o que é favorável ao comportamento e desempenho da estrutura.

Os estudos revelaram dados bastante positivos para se imaginar um grande paralelismo de características entre os CCR confeccionados com agregados

reciclados de RCD e o CCR elaborado de modo tradicional, com agregados naturais britados. Além disso, a expansão do estudo para uma substituição de 100% dos agregados graúdos e pedrisco mostrou-se também viável, sem alterações importantes nos parâmetros resistência, mas com alterações razoáveis em sua porosidade e módulo de elasticidade.

Os resultados indicados no trabalho permitem entender que a pavimentação em concreto trata-se de mais um foco de emprego potencial dos agregados reciclados de resíduos de construção e de demolição como produto final e sustentável ambientalmente. Certamente, com outros procedimentos e dosagens com aumento de consumo de cimento seria possível até mesmo a consideração do material para emprego como revestimento de pavimentos.

Recomendações para estudos futuros

Como se referiu nas discussões de resultados apresentada, não se faz possível ainda nesse momento, uma afirmação categórica sobre o desempenho à fadiga dos materiais estudados com agregados de RCD. Todavia, a resposta para esta questão em aberto é fundamental para o completo desenvolvimento de tecnologia de projeto dos pavimentos que venham empregar o CCR com agregados de RCD. Isto se fará possível futuramente por meio de estudos laboratoriais que permitir identificar as diferenças do comportamento à fadiga desses concretos alternativos em relação aos CCR tradicionais. Sugere-se, nesse caso, o estudo de fadiga de CCR elaborado com dois tipos de agregados reciclados de RCD, com densidades diferentes, partindo-se do pressuposto que 100% de agregados reciclados, graúdos e miúdos, é solução viável.

Outro aspecto que o presente estudo deixa em aberto é o emprego de finos de britagem dos RCD, que foram evitados nos CCR (não completamente eliminados) elaborados. Com base nos estudos e em seus resultados acredita-se ser viável o emprego de agregado miúdo completamente reciclado, sendo, contudo interessante, nesse caso, a verificação da presença nos mesmos de

elementos que eventualmente fossem nocivos ao desenvolvimento das propriedades do concreto endurecido.

Há que se considerar também como variável nos futuros estudos outra possibilidade de energia de compactação, a saber, a energia AASHO modificada, uma vez que a quebra dos grãos de agregados reciclados não aparentou ser fator negativo às potencialidades mecânicas desses concretos. Uma maior quebra de grãos não seria, em princípio, motivos de maiores preocupações, sendo por outro lado importante avaliar redução no consumo de cimento em relação aos concretos estudados nesse trabalho.

Dentro dessas questões surge a necessidade de estudos aprofundados sobre a ação pozolânica que estes agregados e seus finos podem estar proporcionando aos concretos, pois, embora tal aspecto possa não ser relevante para diversas estruturas civis, para o caso de pavimentação, onde a resistência à tração na flexão é o grande parâmetro de controle, possa ser relevante.

Por fim, em caso de futuro emprego dos CCR com agregados reciclados de RCD virem a ser pensados como camada de rolamento, atuando como verdadeiras placas de concreto de revestimento, estudos relacionados à abrasão sofrida pelo material por ação do tráfego devem ser considerados, bem como estudos de pista para determinar a aptidão de equipamentos mais adequados para a compactação e acabamento superficial com menor irregularidade possível.

O próximo passo, contudo, será a transferência dos estudos presentemente realizados para o campo, ou seja, a execução de pavimentos, ainda que em caráter experimental, para finalidades de conhecimento das dificuldades construtivas a serem enfrentadas bem como para monitoração do desempenho de tais pavimentos, em especial tendo o tipo de CCR estudado como camada de base de pavimento asfáltico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. V. **Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação**. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ALAEJOS, P.; SÁNCHEZ, M.; DAPENA, E.; VÁZQUES, E.; BARRA, M.; ETXEBERRIA, M.; MARÍ, A.; AGULLO, L.; MARÍNEZ, F.; FONTEBOA, B.; POLANCO, A.; FRANCISCO, G.; ALEZA, F.; PARRA, J. L.; BURÓN, M.; Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete. **International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures**. Espanha, 2004. p. 511-525.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 325.10R-95**: state-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements. Farmington Hills, MI, USA, 1998. 31p.

ANDRIOLO, F. R. **The use of roller compacted concrete**. São Paulo: Oficina de Textos, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, **Controle Tecnológico da Obra das Marginais da Rodovia Castello Branco**, Relatório de Ensaio nº 15510, Laboratório e Suporte Tecnológico, São Paulo, 2001.

ANGULO, S. C.; **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados** 2000. 155p Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade São Paulo. São Paulo, 2000.

_____. **Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD**. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5, 2002, São Paulo, **Anais...**, São Paulo: IBRACON/IPEN. p 293-307, 2002.

_____. KAHN, N.; JOHN, V.M.; ULSEN, C. **Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição**. In: SEMINÁRIO

DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. CT 206. São Paulo, 2003. IBRACON (CD-ROM).

_____. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** 149 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BALBO, J. T. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos.** 1993. 181 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____. **Alguns conceitos diferenciadores dos materiais estabilizados com cimento.** In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 7., 1996, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: ABPv, 1996. p. 275-294.

_____. **Pavimentos asfálticos híbridos-rígidos: Perspectivas para baixos a elevados volumes de tráfego.** In: 36º REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO 2005, Curitiba. **Anais...** Paraná RAPv 2005.

_____. **Materiais de construção civil: Capítulo 42 – Concreto Asfáltico.** Ed. Geraldo C. Isaia, Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo (no prelo) 2007.

_____. **Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração.** Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BODI, J.; BRITO FILHO, J. A.; ALMEIDA, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1995. p. 409-436.

BRITO, J. A. Cidade versus entulho. **Areia & brita**, São Paulo, p. 22-26, out./dez. 1998.

BUCHER, H. R. E. **Método de dosagem de concreto pobre rolado para pavimentos**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1985. 55 p p. (Estudo técnico 77).

CAMPBELL, C. J. O fim do começo. [Entrevista]. **Veja**, São Paulo, v.38, n. 40, ed 1925, p.p. 11 - 15, 5 out. 2005.

CAPUTO, H.P. (1998), **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6ªed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ.

CARNEIRO, A. P. et al. Construction waste characterization for production of recycled aggregate: Salvador/Brazil. In: WASTE MATERIALS IN CONSTRUCTION, 4., 2000, Leeds. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier, 2000. pp. 825-835.

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

CERVO,T. C.; BALBO,J. T.; SILVA, C. O.; CURTI, R. Estudo sobre medidas de resistência à tração na flexão de concretos para pavimentos com emprego de amostras reduzidas. In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2004. p.p. 12.

CHO,Y. H; YEO, S. H. Application of recycled waste aggregate to lean concrete subbase in highway pavement. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, CA, v. 31, n. 6, p.p. 1101–1108, dec. 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002**: dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <www.ibamapir.hpg.ig.com.br/30702RC.htm>. Acesso em: 8 ago. 2006.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas como contribuição para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. 2004. 204 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DIAZ, P. S. H. **Contribuição ao estudo do concreto rolado para pavimentação**. 1993. 219 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem do Ministério dos Transportes. **Manual de pavimentos de concreto rolado**. v. 1: histórico, características tecnológicas, estado da arte, materiais, dosagem e normas pertinentes, Rio de Janeiro 1992.

DNIT – Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transportes – **Manual de Pavimentação** Publicação IPR – 719, 2006.p. 78-83 Rio de Janeiro

FERRAZ, G. R. et al. Estações de classificação e transbordo na cidade de São Paulo. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON/IPEN, 2001. p. 75-86.

GOES, M. A. C. et al Amostragem. In: LUZ, A. B. et al. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT, 1991. p 17-57.

HUANG, W. L. et al. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. **Resources, Conservation and recycling**, Amsterdam, n. 37, p.p.23-37, 2002.

JOFRE, C. et. al. RCC pavements in Spain In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND REHABILITATION, 4., West Lafayette. **Proceedings...** West Lafayette: Purdue University, 1989. p.p. 587-599, 1989.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102 f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KIM, K.W. e PARK, J.S. **Waste concrete recycling**, KSCE Journal of Civil Engineering p.p. 40, 1992.

LEITE, F.C. **Análise das modificações granulométricas de resíduo sólido de construção civil após compactação**. Seminário da disciplina “PCC 5050 – Reciclagem de resíduos como materiais de construção”; Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005.

LEITE, M. BATISTA **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LILLEY, A.A.; WILLIAMS, R.I.T., **Cement-stabilized materials in Great Britain**. Highway Research Board, HRR 442, p.p. 70-82, Washington, D.C., 1973.

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

LUND, H. F. **The McGraw-Hill recycling handbook**. New York: McGraw-Hill, v.1, cap. 20, 1993.

LUZ, A. B. **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT, 2004. 858 p.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, Ed PINI, São Paulo, 1994.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

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

PITTA, M. R.; DÍAZ, P. S. H. Estado-del-arte de los pavimentos de concreto compactado com rodillo. In: SIMPÓSIO DE OBRAS DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 1., 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: s.n., 1995. p.p. 535–561.

PITTMAN, D. W.; RAGAN, S. A. Drying shrinkage of roller compacted concrete for pavement applications. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 95, n.1, p.p. 19-25, 1998. Technical paper.

POON, C. S. Management and recycling of demolition waste in Hong Kong. **Waste Management and Research**, Hong Kong, v. 15, n.6, p. 561-572, 1997.

RIBEIRO, A. C. B.; ALMEIDA, I. R. Study on high performance roller compacted concrete. **Materials and Structures**, Paris, v. 33, p.p. 398-402, jul. 2000.

PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO. **São Paulo em números**. 1998. Disponível em: <http://portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/planejamento/sp_em_numeros>. Acesso em: 18 out. 2005.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. [O Sindicato]. Rio de Janeiro. 2004. Disponível em: <www.snic.org.br>. Acesso em: 11 jul. 2006.

TRICHÊS, G. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação**: estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento. 365 f. Tese (Doutorado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1993.

VALLE, N., **Utilização de solos residuais saprolíticos na pavimentação rodoviária em Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. 189p. Florianópolis, SC, 1994.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil: Universidade de São Paulo, p.p. 509, 1977.

YRJANSON, W.A. **Recycling Portland Cement Concrete** – Second International Conference on Concrete Pavement Design – Purdue University, West Lafayette, p.p. 431-444, 1981.

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

VITA

Gino Ricci, natural de São Paulo (01/11/1957), Estado de São Paulo, é engenheiro civil (1981) pela Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteado.

Realizou estágio de engenharia civil na Prefeitura Municipal de Santo André na área de análise e aprovação de projetos e de fiscalização de obras particulares. Após formatura, atou em diversas empresas particulares de construção de obras públicas, com especial destaque para obras de terraplenagem, de drenagem e de pavimentação; entre estas empresas incluem-se a SANCO S.A. (1981-1982), VEGA SOPAVE (1984-1988), EMPARSANCO (1989-1993), Construtora São Luis (1994-1997).

De 2000 até 2005 foi gerente de contratos de obras viárias da Associação Brasileira de Cimento Portland, tendo gerenciado as obras de duplicação da Rodovia Castello Branco (SP-280), da Rodovia Sorocaba-Votorantim (SP-79) e do Rodoanel Metropolitano Mário Covas, com destaque para as obras de pavimentação, todas em concreto de cimento Portland. No biênio 1999-2000 realizou especialização em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas.

Em 2004 ingressou no programa de mestrado em Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, dedicando-se a pesquisas laboratoriais com concretos compactados com rolo empregando agregados alternativos oriundos de entulhos de construção e de demolição. Atualmente atua como gerente de contrato na H. Guedes Engenharia S.A. em obras de infra-estrutura viária na cidade de São Caetano do Sul.