

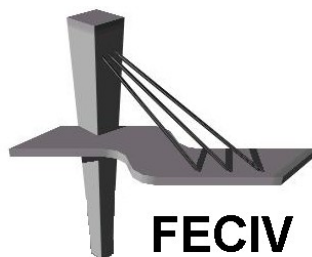
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 025

**ESTUDO COMPARATIVO DE CONCRETOS COM
AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE TELHA
CERÂMICA E AGREGADO GRAÚDO NATURAL**

ADRIANA PINHEIRO FONSECA

UBERLÂNDIA, 04 OUTUBRO DE 2006



FECIV

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Nº 025

Adriana Pinheiro Fonseca

**ESTUDO COMPARATIVO DE CONCRETOS COM AGREGADO
GRAÚDO RECICLADO DE TELHA CERÂMICA E AGREGADO
GRAÚDO NATURAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Área de Concentração: Engenharia das Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Dias

UBERLÂNDIA, 4 DE OUTUBRO DE 2006

*Dedico esta obra, primeiramente,
a Deus; aos meus pais pelo
carinho, exemplo de vida e
educação, e as minhas irmãs
pelo companheirismo do dia a
dia e sincera amizade.*

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho de pesquisa envolve um grande número de pessoas e sua conclusão exige muita dedicação, esforço e força de vontade. É por esse motivo que muito tenho a agradecer a todos que, de uma forma ou outra, colaboraram para a realização desta dissertação de mestrado e, principalmente, porque inúmeras vezes me apoiaram com palavras ou ações, torcendo pelo meu sucesso.

- Nas horas difíceis, uma força invisível sempre nos apóia, nosso criador, DEUS. Não se pode vencer sem a sua ajuda.
- Ao Prof. Dr. João Fernando Dias, em especial, por ter me orientado em todas as fases da pesquisa, tendo paciência comigo, ajudando-me com sua capacidade, conhecimentos e inteligência.
- Ao Prof. Dr. Turíbio José da Silva, pela colaboração e apoio junto a este trabalho, sendo responsável por ter-me ministrado as matérias referentes ao assunto da pesquisa.
- À Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Vidigal de Lima, por ter gentilmente participado da banca de qualificação e pelas valiosas contribuições sugeridas.
- À Faculdade de Engenharia Civil, agradeço pela estrutura, colaborando com todos os profissionais da Engenharia.
- Aos técnicos do Laboratório da FECIV-UFU, José Antônio Veloso, Vanderly Geraldo da Silva e Adelino Gomes, pelo auxílio prestado na realização dos ensaios.
- Às Secretárias da FECIV-UFU, Sueli Maria Vidal da Silva e Maria Nazareth Teixeira, pelo apoio e colaboração.

- Ao laboratório do Instituto de Física, pela contribuição com os ensaios realizados.
- A todos os colegas que me ajudaram de certa forma, Dayane Cristina Alves Ferreira, João Ricardo Lemos, Elizângela de Castro, Renato Acriz Menezes e Fabrício Paulo Silva.
- Aos auxiliares que me ajudaram na execução dos ensaios, Celmar Severino de Moraes, Daniel Márquez Ribeiro Veloso e Wesley Ribeiro de Oliveira.
- Aos Prof. Dr. David George Francis e Prof^a. Dr^a. Alice Cunha Freitas do Casaréu Comunicação e Cultura Limitada, pelo apoio pedagógico oferecido.
- À Prof^a. Ivalda de Fátima Oliveira, pelo apoio na revisão dos textos.
- À Bibliotecária de Referência Maira Nani França Moura Goulart, pela ajuda na revisão de referências e citações.
- À Bom Jesus Materiais p/ Construção, pela doação de materiais.
- À empresa CTR-Araguaia, Uberlândia pela doação de materiais.
- À empresa Holcim, pela doação de cimento Ciminias, colaborando para a execução dos ensaios.
- Ao laboratório de análises da fábrica de Ijaci do Cimento Cauê, pela emissão do certificado de análises do cimento.
- Às minhas queridas irmãs, Eliana Pinheiro Fonseca e Cristina Pinheiro Fonseca e ao meu irmão Geraldo Pinheiro Fonseca Filho, pelo apoio incondicional, pela compreensão e, principalmente, pelo respaldo financeiro.
- Aos meus queridos Pais, Geraldo Pinheiro Fonseca e Lygia Carvalho Pinheiro Fonseca, pelo exemplo, renúncia, dedicação e amor que sempre me dedicaram.

“O conhecimento real não é a construção de alguns dias. É obra do tempo”.

RESUMO

A geração de resíduos e os conseqüentes impactos correlacionados têm preocupado e mobilizado o meio técnico-científico na busca de soluções visando tornar as atividades produtivas sustentáveis. Na cadeia produtiva da construção civil o segmento da fabricação de telhas de cerâmica vermelha gera resíduos após a queima, que usualmente não tem destinação adequada, perdendo a indústria, a administração pública e a sociedade. Diagnóstico conhecido destes resíduos mostra que a quantidade gerada é significativa e existe potencial para sua reciclagem na construção civil, devendo tal possibilidade ser investigada. Neste trabalho foram produzidos concretos de referência com agregados naturais, e outros com substituição parcial e total do agregado graúdo pelo agregado reciclado de telha cerâmica. Este agregado reciclado apresenta diferenças significativas com relação ao agregado graúdo basáltico utilizado, destacando-se a massa específica aparente bem mais baixa e a absorção de água muito mais alta. Os concretos produzidos foram comparados no estado fresco, mantendo-se sob controle o abatimento do tronco de cone. Verificou-se que o consumo de água para a produção do concreto com agregado reciclado é mais elevado e é dependente da taxa de absorção de água do agregado e ainda, a relação a/c efetiva é incerta. As propriedades do estado endurecido: resistência à compressão, resistência à tração, e módulo de elasticidade também foram avaliadas comparativamente. Os concretos com agregado reciclado, apresentaram resistência mecânica mais baixa do que os concretos de referência. Mantendo-se o consumo de cimento e a trabalhabilidade constantes, a resistência mecânica foi melhor ao se utilizar um aditivo plastificante; o mesmo ocorreu ao se manter a relação a/c constante com maior consumo de cimento.

Palavra chave: resíduo de cerâmica; agregado reciclado de telha; concreto com agregado reciclado.

ABSTRACT

The generation of residues and its consequent, correlated impacts has been a concern and has mobilized the technico-scientific field in the search for solutions seeking to make productive activities sustainable. In the productive chain of civil construction the segment of tile production from red ceramics generates residues with no appropriate destination and which, in turn, produces losses to the industry, the public administration and the society. A diagnosis of these residues shows that the generated amount is significant, however there is potential for recycling it in civil construction, which should be investigated. This work reports on both the production of reference concrete with natural aggregates and concrete with partial and total replacement of the large aggregate by the recycled aggregate of ceramic tiles. The recycled aggregate presents significant differences regarding the basaltic large aggregate that was used, with much lower apparent specific mass and much higher absorption of water. The concrete thus produced was compared in the fresh state, controlling for the reduction of the cone log. It was verified that the consumption of water for production of the concrete with recycled aggregate is higher and that it is dependent on the rate of aggregate water absorption. Also, the effective water/cement relation is uncertain. The properties of the hardened state: resistance to compression, resistance to traction, and module of elasticity were also comparatively evaluated. The concrete, with recycled aggregate, presented lower mechanical resistance than the reference concrete. Maintaining the cement consumption and constant workability, the mechanical resistance was superior when using a plasticizer additive. The same occurred when the water/cement relationship was kept constant with higher cement consumption.

Keywords: ceramics residue – recycled aggregate of tiles – concrete with recycled aggregate.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

1.1 SÍMBOLOS

a	Relação agregado miúdo seco/cimento em massa
a/c	Relação água/cimento
C	Consumo de cimento
E_c	Módulo de Elasticidade
f_{cm}	Resistência média à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto
$f_{ct,f}$	Resistência à tração na flexão
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração por compressão diametral
H	Relação água/materiais secos
I_v	Índice de vazios
m	Relação agregados secos/cimento em massa
p	Relação agregado graúdo seco/cimento em massa
γ	Massa específica
γ_a	Massa específica do agregado miúdo
γ_c	Massa específica do cimento
γ_p	Massa específica do agregado graúdo
α	Teor de argamassa

1.2 SÍMBOLOS

A_{mn}	Agregado miúdo natural
A_{gn}	Agregado graúdo natural
ART	Agregado reciclado de telha
T_R	Traço Rico
T_N	Traço Normal
T_P	Traço Pobre
C-B-1	Concreto com agregado graúdo natural (B-1)
C-ART100	Concreto com agregado graúdo reciclado com substituição total de B-1 por ART
C-ART50	Concreto com agregado graúdo reciclado com substituição parcial de B-1 por 50% do ART
T_B C-B-1	Concreto com agregado graúdo natural na seqüência invertida - Traço Normal
T_C C-ART100	Concreto com agregado graúdo reciclado na seqüência invertida, com substituição total de B-1 por ART, introduzindo aditivo depois de feito a argamassa - Traço Normal
T_D C-ART100	Concreto com agregado graúdo reciclado na seqüência invertida, com substituição total de B-1 por ART, introduzindo o aditivo na argamassa – Traço Normal
T_E C-ART00	Concreto com agregado graúdo reciclado na seqüência invertida, com substituição total da B-1 por ART, umidificando o ART em 24 horas com 80% da sua absorção _{sss} – Traço Normal
T_F C-ART100	Concreto com agregado graúdo reciclado na seqüência normal, com substituição total de B-1 por ART, também com substituição de 8% da massa de cimento pelos finos do ART – Traço Normal
T_G C-ART100	Concreto com agregado graúdo reciclado na seqüência normal, com substituição total da B-1 por ART, com adição de cimento e água para retornar a relação a/c inicial – Traço Normal

1.3 SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ACEMC	Associação dos Ceramistas de Monte Carmelo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
FECIV	Faculdade de Engenharia Civil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geologia e Estatística
IPT-EP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
PCC-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PMU	Prefeitura Municipal de Uberlândia
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SINCOTAP	Sindicato das Indústrias de Cerâmica e Olaria do Triângulo Mineiro
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 RESÍDUOS E A CONSTRUÇÃO CIVIL	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 JUSTIFICATIVA	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
CAPÍTULO 2 RESÍDUOS, RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL	8
2.1 TERMINOLOGIA	8
2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E BENEFÍCIOS COM A RECICLAGEM	10
2.3 RESÍDUOS CERÂMICOS E O AGREGADO RECICLADO DE TELHA (ART)	13
2.3.1 A indústria cerâmica	13
2.3.2 Diagnóstico da geração dos resíduos cerâmicos	16
2.3.3 Obtenção do agregado reciclado de telha	18
2.4 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS	19
2.4.1 Composição granulométrica	21
2.4.2 Forma e textura das partículas	23
2.4.3 Massa específica e massa unitária	25
2.4.4 Absorção	27
2.4.5 Resistência mecânica do agregado	32
2.4.6 Características do ART	33
2.5 ALGUMAS NORMAS RELACIONADAS AOS AGREGADOS RECICLADOS	36
CAPÍTULO 3 CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS	38
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	38
3.2 ASPECTOS SOBRE A DOSAGEM DE CONCRETO	38

3.3 ASPECTOS RELATIVOS A CONCRETOS LEVES	41
3.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS	43
3.4.1 Massa específica	43
3.4.2 Trabalhabilidade e Relação a/c	44
3.4.3 Resistência à compressão axial	47
3.4.4 Resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão	49
3.4.5 Módulo de deformação	51
3.4.6 Aditivo	53
3.4.7 Materiais pozolânicos	54
CAPÍTULO 4 ASPECTOS METODOLÓGICOS	56
4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL	56
4.1.1 Variáveis estudadas	56
4.1.2 Variáveis fixas	57
4.1.3 Variáveis que foram alteradas	62
4.2 CONCRETO - PROPRIEDADES AVALIADAS	63
4.2.1 Massa específica	64
4.2.2 Trabalhabilidade	64
4.2.3 Resistência à compressão axial	64
4.2.4 Resistência à tração na flexão	64
4.2.5 Resistência à tração por compressão diametral	64
4.2.6 Módulo de deformação	65
4.2.7 Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica seca	65
4.3 METODOLOGIA ADOTADA NA REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO- DOSAGEM EXPERIMENTAL	65
4.3.1 Ajuste do teor de argamassa	65
4.3.2 Traços auxiliares	66
4.3.3 Produção dos concretos	67
4.3.4 Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova.	75
4.4 MATERIAIS UTILIZADOS	77
4.4.1 Cimento	78
4.4.2 Agregados - Distribuição granulométrica	80

4.4.3 Agregados – Índice de forma	85
4.4.4 Agregados - massa específica, massa unitária e absorção	86

CAPÍTULO 5 ESTADO FRESCO - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS **92**

5.1 CONSUMO DE ÁGUA	92
5.1.1 Consumo de água dos concretos C-ART100	95
5.1.2 Consumo de água dos concretos C-ART50	96
5.1.3 Consumo de água dos traços adicionais	102
5.1.4 Considerações gerais	104
5.2 MASSA ESPECÍFICA	105
5.2.1 Considerações gerais	107
5.3 TRABALHABILIDADE	108
5.3.1 Considerações gerais	113

CAPÍTULO 6 ESTADO ENDURECIDO - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS **114**

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	114
6.1.1 Diagrama de dosagem C-B-1	119
6.1.2 Diagrama de dosagem C-ART100	121
6.1.3 Diagrama de dosagem C-ART50	122
6.1.4 Diagrama e avaliação das resistências segundo o modelo de Powers (1960)	128
6.1.5 Traços adicionais	155
6.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	160
6.2.1 Resistência à tração por compressão diametral	160
6.2.2 Resistência à tração na flexão	162
6.2.3 Considerações gerais	165
6.3 MASSA ESPECÍFICA SECA	166
6.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	171
6.5 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	173

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES FINAIS **180**

7.1 INFLUÊNCIA DO ART NA PRODUÇÃO DO CONCRETO	180
---	-----

7.2 INFLUÊNCIA DO ART NO ESTADO ENDURECIDO _____	182
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS _____	184
REFERÊNCIAS _____	186
ANEXO A _____	195
ANEXO B _____	196
ANEXO C _____	197
ANEXO D _____	198
ANEXO E _____	199
ANEXO F _____	200

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização de deposição clandestina de cacos de telhas na periferia da cidade de Monte Carmelo Fonte: Dias (2004b).....	17
Figura 2.2 – Agregado Graúdo Reciclado de telhas (ART)	19
Figura 4.1 – Teor de argamassa e relação a/c.....	66
Figura 4.2 – Diagrama de dosagem do concreto de referência	68
Figura 4.3 – Curvas de distribuição granulométrica dos agregados miúdos naturais da AVG e BJ	80
Figura 4.4 – Agregado graúdo reciclado de telha de cerâmica vermelha - ART	82
Figura 4.5 – Curva de distribuição granulométrica do agregado reciclado de telha (ART)	82
Figura 4.6 – Curva de distribuição granulométrica do ART e ART lavado.....	83
Figura 4.7 – Curvas de distribuição granulométrica do ART e da Brita 1	84
Figura 4.8 – Curva de secagem: velocidade da perda de água × teor de umidade (%).....	88
Figura 4.9 – Ensaio de saturação do ART: Amostra do agregado submersa com balança acoplada para o ensaio hidrostático	89
Figura 4.10 – Conteúdo de água em percentual da absorção _{sss} do ART em função do tempo de imersão decorrido	89

Figura 4.11 – Velocidade de ganho de massa de água em função com tempo (variação diferencial da massa de água em gramas para cada 30 segundos de imersão).....	90
Figura 5.1 – a) aspecto do ART quando se procurou deixá-lo no estado saturado superfície seca; b) Ilustração da formação de pelotas e grumos de cimento ao se preparar o concreto com ART na mesma seqüência de mistura dos concretos com B-1	94
Figura 5.2 – Consumo de água excedente em porcentagem da absorção _{SSS} do ART: (a) para substituição de 100% da B-1 por ART; (b) para substituição de 50%	100
Figura 5.3 – Massa específica de diferentes séries de concretos no estado fresco.....	105
Figura 5.4 – Massa específica no estado fresco das diferentes séries de concreto estudadas	106
Figura 5.5 – Massa específica de diferentes séries de concretos no estado fresco.....	107
Figura 5.6 a) Concreto C-ART100 – Traço Rico	108
Figura 5.7 a) Concreto C-ART50 Traço rico	108
Figura 5.8 a) Concreto C-ART100 Traço normal- T_C	109
Figura 5.9 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone dos concretos.....	110
Figura 5.10 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone dos traços adicionais	111
Figura 5.11 – Abatimento dos concretos e a sua relação $a/c_{\text{provável}}$	112
Figura 5.12 – Abatimento dos concretos e a relação a/c traços adicionais	112
Figura 5.13 – Abatimentos dos concretos e a relação $a/c_{\text{provável}}$ dos concretos	113
Figura 6.1 – Máquina (modelo DL Emic) utilizada nos ensaios para o rompimento dos corpos-de-prova	115

Figura 6.2 – Resistência relativa dos concretos C-ART100 e C-ART50 em relação aos concretos C-B-1, nas idades aos 7 e 28 dias.....	118
Figura 6.3 – Diagrama de dosagem da propriedade resistência à compressão do C-B-1..	120
Figura 6.4 – Corpo-de-prova rompido do concreto C-ART100, no traço normal, aos 28 dias	124
Figura 6.5 – Diagrama de dosagem da propriedade de resistência à compressão dos concretos de referência e concretos com ART, aos 7 dias	125
Figura 6.6 – Diagrama de dosagem da propriedade de resistência à compressão dos concretos de referência e concretos com ART, aos 28 dias	126
Figura 6.7 – Relação entre as resistências $R_{c, experimental} / R_{c, Powers}$ dos concretos C-B-1, C-ART100 e C-ART50	154
Figura 6.8 – Resultados de resistência à compressão, aos 7 dias, dos traços adicionais...	157
Figura 6.9 – Resultados de resistência à compressão, aos 28 dias, dos traços adicionais.	158
Figura 6.10 - a) corpo-de-prova a ser rompido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. b) corpo-de-prova rompido.....	160
Figura 6.11 – a) corpo-de-prova a ser rompido no ensaio de resistência à tração na flexão b) corpo-de-prova rompido.....	162
Figura 6.12 – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 28 dias.....	164
Figura 6.13 – Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão aos 28 dias	165
Figura 6.14 – Relação da massa específica seca com a resistência à compressão dos concretos (ensaios aos 28 dias).....	168

Figura 6.15 – Relação entre o Fator de eficiência e o consumo de cimento (ensaios aos 28 dias)	170
Figura 6.16 – Relação entre a Resistência à compressão e o consumo de cimento (ensaios aos 28 dias).....	170
Figura 6.17 – Ensaio do módulo de elasticidade a) corpo-de-prova a ser rompido b) corpo-de-prova rompido	173
Figura 6.18 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos C-B-1, C-ART100 e C-ART50	175
Figura 6.19 – Equações de comportamento - módulo de elasticidade \times resistência à compressão - obtidas com os resultados dos experimentos.....	176
Figura 6.20 – Projeção de valores do módulo de elasticidade, a partir das equações de comportamento, conforme a variação da resistência à compressão	176

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Classificação de agregados.....	20
Tabela 2-2 – Classificação da forma de partículas.....	24
Tabela 2-3 – Massa específica de diversos grupos de minerais.....	25
Tabela 2-4 – Massa específica dos agregados reciclados em função do componente e da faixa granulométrica utilizada.....	26
Tabela 2-5 – Absorção de água de agregados reciclados de diferentes composições.....	29
Tabela 2-6 – Taxas de absorção de agregados reciclados em função do tipo de componente e da granulometria.....	30
Tabela 2-7 – Resistência mecânica do agregado de tijolos.....	32
Tabela 2-8 – Propriedades caracterizadas no ART.....	34
Tabela 3-1 – Tolerâncias admitidas para consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone – NBR 7223.....	46
Tabela 3-2 – Trabalhabilidade das misturas de concreto medido pelo abatimento de tronco de cone.....	46
Tabela 4-1-Agregados utilizados.....	58
Tabela 4-2 – Esquema de variáveis ensaiadas no programa experimental e nº. CP's.....	60
Tabela 4-3 – Esquema de variáveis ensaiadas no programa experimental e nº. CP's.....	61

Tabela 4-4 – Propriedades avaliadas e os métodos de ensaios.....	63
Tabela 4-5 – Traços iniciais dos concretos e quantidade de materiais.....	69
Tabela 4-6–Traços finais, quantidade de materiais e abatimento de tronco de cone	70
Tabela 4-7 – Traços adicionais iniciais e quantidade de materiais.....	71
Tabela 4-8 –Traços adicionais: traços finais, quantidades de materiais e abatimento de tronco de cone.....	75
Tabela 4-9 – Resumo da quantidade de corpos-de-prova para cada tipo de traço × Idades	76
Tabela 4-10 – Propriedades avaliadas dos agregados e os métodos de ensaios	77
Tabela 4-11 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland	78
Tabela 4-12–Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland.....	79
Tabela 4-13– Agregado miúdo natural: Bom Jesus e Areia Volta Grande	81
Tabela 4-14 – Composição granulométrica do agregado reciclado de telha.....	83
Tabela 4-15 – Composições granulométricas dos agregados B-1 e ART	85
Tabela 4-16 – Resultados do ensaio do índice de forma dos agregados	85
Tabela 4-17 – Resultados da massa específica, massa unitária e absorção dos agregados .	86
Tabela 4-18-Massa específica, Absorção de água e porosidade de massas cerâmicas	87
Tabela 4-19- Ganho de água do ART com o tempo na Betoneira	90
Tabela 5-1-Cálculo dos consumos de água dos concretos C-ART100	96
Tabela 5-2-Cálculos dos consumos de água dos concretos com ART50	98
Tabela 5-3-Resultados obtidos na preparação dos traços de concretos com ART	99

Tabela 5-4-Cálculos dos consumos de água dos traços adicionais dos concretos com ART100	102
Tabela 5-5-Resultados obtidos na preparação dos traços adicionais de concretos com ART	103
Tabela 5-6-Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone	109
Tabela 6-1-Resistência à compressão e massa específica aparente	116
Tabela 6-2-Relação entre as resistências: $f_{c,7} \div f_{c,28}$	117
Tabela 6-3-Resultados da água de cristalização para o cimento CP II E 32 (Cauê).....	130
Tabela 6-4-Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TN), $\alpha_H = 100\%$, aos 28 dias..	131
Tabela 6-5-Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TN), $\alpha_H = 67\%$, aos 28 dias....	133
Tabela 6-6-Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TR), $\alpha_H = 100\%$, aos 28 dias..	135
Tabela 6-7-Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TR), $\alpha_H = 67\%$, aos 28 dias....	136
Tabela 6-8-Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TP), $\alpha_H = 100\%$, aos 28 dias ..	137
Tabela 6-9-Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TR), $\alpha_H = 67\%$, aos 28 dias....	138
Tabela 6-10-Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TN) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias	139
Tabela 6-11-Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TN) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias	140
Tabela 6-12-Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TR) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias.....	141
Tabela 6-13-Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TR) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias.....	142
Tabela 6-14-Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TP) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias	143
Tabela 6-15-Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TP) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias	144

Tabela 6-16– Resistências à compressão (C-B-1 e C-ART100): resultados experimentais e resultados obtidos pelo modelo de Powers.....	145
Tabela 6-17–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TN) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias	147
Tabela 6-18–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TN) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias	148
Tabela 6-19–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TR) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias.....	149
Tabela 6-20–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TR) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias.....	150
Tabela 6-21–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TP) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias.....	151
Tabela 6-22–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TP) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias.....	152
Tabela 6-23– Resistências à compressão (C-B-1 e C-ART50): resultados experimentais e resultados obtidos pelo modelo de Powers.....	153
Tabela 6-24–Resultados obtidos dos traços adicionais dos concretos no estado endurecido	156
Tabela 6-25–Resultados de resistência à tração por compressão diametral e à compressão dos concretos (MPa)	161
Tabela 6-26–Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos.....	163
Tabela 6-27-Resistência à compressão e massa específica seca dos concretos	166
Tabela 6-28-Valores estipulados segundo da norma NM 35 (ABNT, 1995).....	167
Tabela 6-29-Absorção de água e Índice de vazios	171
Tabela 6-30 – Resultados dos ensaios do módulo de deformação tangente inicial e a resistência à compressão dos concretos.....	174
Tabela 6-31 - Equações do módulo de elasticidade (CEB e ACI)	177

Tabela 6-32-Valores do módulo de deformação obtidos pelas equações do CEB e da ACI para os concretos C-B-1, C-ART100 e C-ART50.....	178
---	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 RESÍDUOS E A CONSTRUÇÃO CIVIL

A geração de resíduos e os impactos correlacionados têm preocupado e mobilizado o meio técnico-científico na busca de soluções visando tornar as atividades produtivas sustentáveis.

A visão de progresso vem se confundindo com um crescente domínio e transformação da natureza, sendo os recursos naturais vistos como ilimitados. Em trabalhos consultados, de diversos pesquisadores, dentre eles Hansen (1992), Hendriks et. al. (1998b), Pinto (1999), John (2000) e Dias et. al. (2001), percebe-se a concordância sobre a necessidade de reestruturação do modelo linear de desenvolvimento, para que se possa garantir a preservação ambiental e até mesmo a sobrevivência da espécie humana. Esses estudiosos alertam sobre a necessidade de se avaliarem todos os impactos das atividades de produção e de consumo, desde a extração da matéria prima e os processos industriais, até o transporte e o destino dos resíduos de produção, além, é claro, do destino que se dará aos produtos após sua utilização.

O macro setor da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais do planeta. Segundo Sjöström (1996), a construção civil consome, no mundo, entre 14% e 50% desses recursos. No Brasil, segundo John (2000), pode-se estimar um consumo anual de 210 milhões de toneladas de agregados somente na produção de concretos e argamassas.

A geração dos resíduos da construção e demolição (RCD), também denominados de entulhos da construção, atinge de 230 a 760 kg/hab.ano, representando entre 41% e 70% do resíduo sólido municipal, segundo dados das pesquisas de Pinto (1999), em 10 cidades

brasileiras. Na cidade de Uberlândia, os resíduos da construção civil somam mil toneladas por dia ou aproximadamente 2 kg/hab.dia (DIAS, 2004a). São quantidades vultosas que exigem medidas de minimização da geração e também de gestão dos resíduos.

A busca da sustentabilidade do setor da construção civil e da preservação do meio ambiente tem fomentado a realização de pesquisas voltadas para o emprego de agregados reciclados, originados de resíduos sólidos de diversas origens.

A construção civil consome agregados, que são materiais naturais não renováveis e estão se tornando escassos em algumas regiões do país. Por outro lado, a geração e descarte de resíduos sólidos pelas atividades ligadas à construção civil, e também por outras atividades de produção, causam impactos ambientais de diversas ordens.

A reciclagem dos resíduos na construção civil surge como uma necessidade para a preservação do meio ambiente e é uma das possíveis alternativas para suprir a demanda de agregados para emprego na construção civil.

Com surgimento na década de 90, a reciclagem apresenta vantagens ambientais e econômicas e vem recebendo grande impulso no Brasil com a implantação de recicladoras em municípios médios e grandes. Empresários também passaram a se interessar pelo assunto, individualmente ou em parcerias com prefeituras, pois parecia ser este o caminho mais indicado. Institutos de Pesquisas e Universidades passaram também a estudar os agregados reciclados e seus usos, gerando embasamento técnico e teórico importantes para o emprego desses materiais (PINTO, 1999).

Por outro lado, a Resolução nº. 307, de 05/07/2002 do CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, classifica os resíduos da construção civil como classe A, indica a destinação e estipula prazos para que órgãos públicos e privados providenciem planos integrados de gerenciamento de resíduos, para disciplinar as ações necessárias para minimizar os impactos ambientais.

Para o emprego de agregados reciclados em concreto de cimento Portland, é necessário conhecê-los completamente e as implicações de seu emprego no estado fresco, no estado endurecido e na durabilidade do concreto.

Na cadeia produtiva da construção civil, o segmento da fabricação de telhas de cerâmica vermelha gera resíduos após a queima e esses resíduos, geralmente, não têm destinação adequada, perdendo a indústria, a administração pública e a sociedade (DIAS, 2004b). Este autor realizou o diagnóstico desses resíduos, tendo como referência os pólos industriais das cidades de Monte Carmelo e Ituiutaba, em Minas Gerais, mostrando que a quantidade gerada é significativa e existe potencial para sua reciclagem na construção civil, devendo para isso ser investigado.

No âmbito dos estudos realizados por Dias (2004b), os resíduos da fabricação de telhas cerâmicas foram britados, obtendo-se o Agregado Reciclado de Telha (representado pela sigla ART). Esse agregado foi obtido em duas frações granulométricas distintas: uma representada pelas frações passantes na peneira de malha 19 mm e retidas na peneira de malha 12,5 mm e outra pelas frações passantes na peneira de malha 12,5 mm até pó, abrangendo, portanto, os agregados miúdos e graúdos.

Vislumbrando a possibilidade do emprego do agregado reciclado de telha em concretos estruturais de baixas e médias resistências, desenvolveu-se uma avaliação comparativa com agregados naturais (brita basáltica), a exemplo de pesquisas realizadas com outros tipos de agregados reciclados de cerâmica vermelha, relatadas por Barra (1996), Bicca (2000), Leite (2001), Hansen (1992) e Mansur et. al. (1999).

Neste trabalho produziram-se três famílias de concretos de cimento Portland com agregados naturais, sendo o agregado graúdo a brita basáltica. Comparou-se o desempenho desses concretos no estado fresco e endurecido, com concretos produzidos por substituição da brita natural pelo agregado reciclado de telha (ART).

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a possibilidade de utilização de resíduos gerados nas indústrias de telhas cerâmicas, reciclados por britagem, produzindo o Agregado Reciclado de Telha (ART), especificamente a fração graúda, como substituto parcial ou total do agregado graúdo natural (brita basáltica) para a produção de concretos de cimento Portland.

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Analisar algumas propriedades físicas dos agregados reciclados de telhas cerâmicas, de interesse para a aplicação em concreto, em comparação com o agregado graúdo basáltico (B-1).
- Avaliar a influência da substituição do agregado graúdo natural por ART nas propriedades do concreto no estado fresco (consumo de água, massa específica e trabalhabilidade).
- Avaliar a influência da substituição do agregado natural por ART nas propriedades do concreto no estado endurecido (massa específica, absorção de água por imersão, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de deformação do concreto).

1.3 JUSTIFICATIVA

A reciclagem de resíduos de construção é praticada já há algum tempo. A reutilização de resíduos surgiu a partir da conscientização a respeito da problemática do desperdício nas construções. Por outro lado, a necessidade premente de reconstrução de cidades destruídas, ou por guerras ou por catástrofes naturais, deu origem a técnicas bem-sucedidas de reaproveitamento dos resíduos e de aplicação dos mesmos na produção de artefatos e outros serviços para construção, conforme mostram os resultados de pesquisas desenvolvidas na Europa, nos Estados Unidos, na Rússia e no Japão (LEVY, 2001; HANSEN, 1992 e outros).

Na Alemanha, por exemplo, em 1999, grandes elementos de concreto foram usados para contornar um enorme jardim. Alguns desses elementos foram fabricados com agregados reciclados de tijolos de argila, outros de concreto, e os demais com a mistura deles. Mas, já desde 1945, os escombros pós-guerra, constituídos principalmente de alvenaria, em quantidade estimada em 600 milhões de m³, foram utilizados para a reconstrução das cidades. No Reino Unido, foram usados 1.500 m³ de agregados de concreto em fundações, lajes e pilares. Em outro projeto, mais de 4.000 m³ de concreto foram preparados, com

40% de agregado reciclado de dormente de concreto de ferrovia, substituindo o agregado natural (DIAS, 2004b).

No Brasil, algumas pesquisas com agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD) e de tijolos cerâmicos mostram ser possível o aproveitamento em concreto, mas fica claro a necessidade de melhor conhecerem-se os agregados reciclados. Os pesquisadores Bicca (2000), Leite (2001), Levy (2001), Lima (1999), dentre outros, utilizaram esses resíduos e constataram a necessidade de investigações para serem empregados nos diversos ramos da construção civil.

A fabricação de telha cerâmica gera resíduos da queima, constituídos por peças defeituosas que não podem ser comercializadas e são descartadas sem uma destinação definida (Dias, 2004b). Atualmente, existem cerca de 7 mil indústrias de cerâmica vermelha no país, com uma produção média por indústria em torno de 365 mil peças por mês, de acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC, 2003). Segundo Dias (2004b), a quantidade de resíduos gerados na fabricação de telhas cerâmicas é volumosa e justifica a reciclagem. Esse autor estima que 3% da produção de cerâmica podem ser um percentual médio de geração de resíduos. Por essa estimativa, seriam aproximadamente 11 mil peças descartadas, ou cerca de 19 mil quilos mensais por indústria.

Desde que esses resíduos não sejam contaminados, eles apresentam, em geral, potencial para a reciclagem, mas são necessários estudos específicos para sua comprovação.

Dias (2004b) diagnosticou a produção de telhas de aproximadamente 52 milhões de peças por mês, considerando os dois pólos produtivos de Ituiutaba e Monte Carmelo, em Minas Gerais. Somente na região de Monte Carmelo, a geração de resíduos da fabricação atingia cerca 2,3 mil toneladas/mês, com as quais seria possível produzir 2,2 mil m³ de agregado reciclado mensalmente. Seu estudo mostra um potencial quantitativo de aproveitamento que pode trazer grandes benefícios para a região, corroborado pelo quadro de impactos ambientais da fabricação e financeiros dos resíduos gerados, justificando assim sua reciclagem.

Este trabalho veio dar continuidade à pesquisa de Dias (2004b), no sentido de potencializar o resíduo de telhas para o emprego em concreto de cimento Portland, agregando valor ao

mesmo. Para tanto se faz necessária a investigação das conseqüências, da substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado de telha, nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

As constatações obtidas neste estudo, por sua vez, servirão de subsídios para avaliação de resíduos da fabricação de cerâmica vermelha em outras regiões do país, contribuindo para a diminuição da exploração de agregados naturais; para a minimização dos impactos do descarte dos resíduos e, até mesmo ajudando socialmente com a oferta de agregados, provavelmente com menor custo global, a ser investigado posteriormente.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A apresentação deste trabalho está dividida em sete capítulos, conforme discriminação a seguir.

O primeiro capítulo inicia com a introdução, apresentando o panorama sobre os resíduos e a construção civil, os objetivos propostos, a justificativa do estudo e a estrutura da apresentação do trabalho.

O segundo capítulo apresenta o estado-da-arte sobre o aproveitamento de resíduos em concreto, com abordagem sobre a terminologia corrente; o panorama da geração e a reciclagem dos resíduos; panorama dos resíduos cerâmicos; diagnósticos de geração dos resíduos cerâmicos; a origem do agregado reciclado de telha, as propriedades dos agregados e algumas recomendações normativas definidas para o destino dos resíduos.

O terceiro capítulo descreve o estudo teórico da metodologia empregada para a dosagem dos concretos, fundamentos relativos a concretos leves e as propriedades analisadas do concreto.

O quarto capítulo descreve os aspectos metodológicos da pesquisa, apresentando o desenvolvimento e planejamento do experimento, as propriedades avaliadas e os materiais utilizados nos concretos.

No quinto capítulo, apresentam-se a análise e discussão dos resultados dos ensaios do concreto no estado fresco como o consumo de água, a massa específica e a trabalhabilidade.

O sexto capítulo apresenta a análise e discussão dos resultados dos ensaios do concreto no estado endurecido, tais como: a resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral, a resistência à tração na flexão, massa específica seca, a absorção de água por imersão, índice de vazios e o módulo de deformação do concreto.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

Finalizando, são apresentadas as referências e os anexos.

CAPÍTULO 2

RESÍDUOS, RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Neste capítulo apresenta-se o resultado da pesquisa da literatura, onde se procuraram abordar as questões ligadas aos resíduos, à reciclagem e à construção civil, tais como, a terminologia corrente; o panorama da geração e a reciclagem de resíduos; panorama dos resíduos cerâmicos; diagnósticos da geração dos resíduos cerâmicos; a origem do agregado reciclado de telha; as propriedades dos agregados e algumas recomendações normativas definidas para o destino dos resíduos.

2.1 TERMINOLOGIA

Para se tratar do estudo comparativo de concreto com agregados naturais, com substituição de agregados reciclados de telhas cerâmicas, é interessante listar alguns termos comumente empregados e utilizados no contexto da dissertação.

Apresentam-se assim, alguns termos que já estão definidos na norma dos Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - NBR 15116 (ABNT, 2004) do Projeto NBR 18:201.06-001 e os outros termos que foram adotados nesta dissertação, a fim de que tragam melhor enriquecimento e definição para a compreensão do assunto.

Concreto convencional: concreto produzido com agregado graúdo e miúdo naturais.

Concreto de agregado reciclado: concreto produzido com agregado reciclado, sendo os agregados reciclados substituídos totalmente ou parcialmente (NBR 15116 (ABNT, 2004)).

Agregado original: agregados utilizados para a produção de concreto original ou convencional. Os agregados originais podem ser naturais ou manufaturados.

Terminologia adotada para os agregados originais, correspondentes:

- *Amn:* agregado miúdo natural
- *Agn:* agregado graúdo natural

Agregado Convencional: agregado comumente utilizado em concretos e argamassas, agregado de origem natural, como areia de rio e pedra britada, por exemplo.

Resíduo de Construção Civil: resíduos sólidos, provenientes das atividades de construção, demolição e reforma de estruturas e pavimentos e da indústria da construção, basicamente composto por: concretos, rochas, argamassas, metais, madeiras, blocos, tijolos, cerâmicas, solos, gesso, asfalto e, em menor grau, plásticos, borrachas, papéis (NBR 15116 (ABNT, 2004)).

Agregado Reciclado: material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção e demolição de obras civis, que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infra-estrutura (NBR 15116 (ABNT, 2004)).

Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação (NBR 15116 (ABNT, 2004)).

Dias (2004b), na proposta do seu trabalho, empregou a seguinte terminologia:

Agregado Reciclado de Telha (ART): agregado proveniente dos resíduos da fabricação das cerâmicas vermelhas, ou seja, cacos de telhas, podendo ser graúdo ou miúdo.

2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E BENEFÍCIOS COM A RECICLAGEM

Os resíduos de construção e demolição (RCD), geralmente, são constituídos em cerca de 90% por frações de natureza mineral (concretos, argamassas, rochas naturais, solos e cerâmicas), tanto no Brasil como na Europa (CARNEIRO et al., 2000 apud ÂNGULO; JOHN, 2002; FERRAZ et al., 2001). Do ponto de vista químico, a composição estimada do RCD brasileiro, em óxidos, seria majoritariamente sílica, seguido de alumina e óxido de cálcio (ÂNGULO et. al., 2002).

Na União Européia, são produzidos cerca de 180 milhões de toneladas de RCD por ano, ou cerca de 480 kg/hab.ano (CARRIJO, 2005). A quantidade de RCD (Resíduos de Construção e Demolição) gerada é significativa em muitos países do mundo, com estimativas variando 136 kg/ hab. a 3359 kg/hab. por ano. Em diversos países, a geração RCD, em relação ao total de resíduos sólidos urbanos (RSU) em massa, é predominante, variando 13% a 80%. Essas variações se devem às diferenças nos critérios de classificação, no controle de geração de resíduos, nas tecnologias disponíveis e nos materiais empregados em cada país. Já no Brasil, é gerado e estima-se, anualmente, algo em torno de $68,5 \times 10^6$ t. de RCD e na cidade de São Paulo, uma das cidades mais populosas do Brasil, gera-se 4000 toneladas de RCD/dia (ÂNGULO; JOHN, 2002).

O setor da construção civil é um grande consumidor de recursos naturais não-renováveis. Os agregados naturais estão entre os minerais mais consumidos no Brasil e no mundo, sendo que no Brasil estima-se um consumo de $380,6 \times 10^6$ t/ano, além de impactos ambientais relevantes como geração de áreas degradadas em volta do setor urbano e transporte intensivo. Na cidade de São Paulo, estima-se que a distribuição de areia natural, na Região Metropolitana de São Paulo, seja responsável por 1,35 milhões de viagens/ano (ÂNGULO et. al., 2002).

Na cidade de Uberlândia (MG), com mais de 500 mil habitantes, o entulho da construção civil atinge a marca de 1000 toneladas diárias (2 kg/hab.dia), superando os resíduos sólidos municipais que atingem 360 toneladas diárias (760 g/hab.dia)¹.

Portanto, a reciclagem de RCD é uma forma de aproximar o setor da sustentabilidade, através da redução dos impactos negativos dos seus resíduos nas cidades e da geração de matéria-prima que pode ser substituída pela natural, não-renovável (ÂNGULO et. al., 2002).

A estimativa da quantidade de serviços ou obras que se podem executar com os resíduos permite vislumbrar um campo de benefícios, constituindo-se em importante parâmetro para a decisão de se reciclarem os resíduos.

Chini e Monteiro (1999) apresentaram a preocupação nos Estados Unidos com a crescente demanda por agregados naturais para a produção de concreto e também o aumento da disposição de concreto após sua vida útil, o que tem provocado problemas ambientais e aumento dos custos para a disposição dos resíduos na Florida. Citando Goldstein (1995), esses autores afirmaram que, na Terra, uma tonelada de concreto é produzida por pessoa por ano, e que somente a água é mais consumida do que o concreto no mundo. Por isso aponta-se a reciclagem de concreto para a produção de agregados para camadas de base de pavimentos como uma medida importante para aliviar os problemas ambientais advindos da produção de agregados em pedreiras e da disposição dos resíduos.

Segundo Pinto (1999), para a execução de uma edificação residencial de 50 m² de área construída, seriam gastos 30 m³ de resíduos reciclados para se executarem as fundações, vedações revestidas e contrapisos. Ainda segundo esse autor, para a execução de 1 metro de sub-base de pavimentação urbana, com 15 cm de espessura e 9 m de largura, seria necessário, em média 1,35 m³ de resíduos.

Já D'Ávila (1999) apresenta os seguintes dados sobre a reciclagem de entulhos da construção civil na cidade de Belo Horizonte/MG: para a quantidade de 38.325 toneladas no ano de 1997, estima-se uma reciclagem de 8,8 mil t/mês e conseqüente produção de

¹ Dados publicados no Jornal Correio, Caderno Geral, www.jornalcorreio.com.br, (Uberlândia, 01/06/2004).

5.500 m³ de agregados reciclados. Com essa quantidade, poderiam ser executados, por exemplo: Sub-base ou tratamento primário de ruas, totalizando 4 mil metros linear/mês; Briquetes para calçadas: 35 mil m/mês; Blocos para muração 40 mil m/mês; Blocos para alvenaria de 920 casas populares com 40 m² de área construída/mês; dentre outras possibilidades.

Dados obtidos da Secretaria de Habitação, da Prefeitura Municipal de Uberlândia-PMU², que quantificam em 20 m³ a necessidade de agregados (sendo 10 m³ de areia média, 7,5 m³ de areia fina, e 2,5 m³ de brita 1) para a execução de uma unidade habitacional com área construída de 42,54 m², estando incluídos os seguintes serviços: concreto para 11 brocas de fundação (Φ20cm x 1,5m), preenchimento de canaletas dos baldrames (14cmx19cm) e contrapiso com espessura máxima de 5 cm; argamassa para assentamento e revestimento de alvenarias internas e externa (SOUZA, 2005).

Com essas perspectivas de reaproveitamento de resíduos da construção civil, foram realizadas várias pesquisas nessa área, com o objetivo de desenvolver metodologias de avaliação; técnicas e equipamentos de ensaio para fomentar o uso de resíduos na construção de pavimentos, em concretos, e outras aplicações, observando-se que as especificações para os materiais naturais, não necessariamente se aplicam aos reciclados.

Ressalta-se a importância da obtenção de informações fidedignas sobre os materiais reciclados, devendo ser considerada a realidade local e/ou regional para a apuração dos dados necessários para análises mais pormenorizadas, que permitam determinar a origem, o fluxo, a destinação e a intensidade de problemas agregados.

² Memorial descritivo (cópia) fornecido pela Secretaria Municipal de Habitação da Prefeitura Municipal de Uberlândia, maio de 2004.

2.3 RESÍDUOS CERÂMICOS E O AGREGADO RECICLADO DE TELHA (ART)

2.3.1 A indústria cerâmica

A indústria da cerâmica é uma das mais antigas do mundo, em vista da facilidade de fabricação e abundância da matéria-prima, o barro. Já no período neolítico, o homem pré-histórico calafetava as cestas de vime com o barro. Mais tarde verificou que podia dispensar o vime e fez potes só de barro. Posteriormente, constatou que o calor endurecia esse barro e surgiu a cerâmica propriamente dita que, nessa fase da Humanidade, foi largamente empregada para os diversos fins (BAUER, 1994).

Sendo de domínio milenar, remontando há cerca de sete mil anos no Oriente Médio, o processo para a fabricação de elementos de cerâmica vermelha, tais como telhas e tijolos, é bastante conhecido. Há descobertas de indícios arqueológicos de que as primeiras construções foram erguidas na Mesopotâmia, na grande zona compreendida entre os rios Tigre e Eufrates. Inicialmente os blocos cerâmicos foram utilizados no estado seco, sem serem submetidos ao processo de queima, embora este já fosse conhecido. Somente por volta de 3000 a.C. foram empregados blocos queimados no revestimento externo de grandes construções como forma de proteger a camada interna construída com blocos secos. Na história antiga, também em pontos distintos como China, Babilônia e Grécia Helênica são encontrados elementos de cerâmica vermelha queimados e mesmo glazurados (SANTOS, 2001).

No Egito, a utilização de elementos de cerâmica vermelha foi posterior àquela da Mesopotâmia, sobretudo porque as grandes construções egípcias eram edificadas em pedra, materiais sempre disponíveis em grandes quantidades. Entretanto, algumas pirâmides, por exemplo, eram construídas internamente com blocos cerâmicos secos e revestidas externamente de pedra. Os egípcios desenvolveram a fabricação de cerâmicas nos mais diversos aspectos e formas. Porém, os tipos mais utilizados apresentavam dimensões muito similares às utilizadas atualmente (SANTOS, 2001).

Na Roma Antiga, eram utilizadas telhas cozidas de boa qualidade e tijolos queimados, nas construções, sobretudo, durante o período imperial. Foram os romanos que estabeleceram a fabricação de cerâmicas como atividade industrial (SANTOS, 2001).

Como se pode observar, as construções, utilizando blocos cerâmicos, estiveram presentes em diversas civilizações, o que fez com que a cerâmica vermelha contribuísse também para o desenvolvimento de diferentes estilos arquitetônicos em diferentes épocas (SANTOS, 2001).

No Brasil, a fabricação de cerâmica vermelha teve origem no século XVI, nos estados da Bahia e Pernambuco, espalhando-se até os dias de hoje, por todos os estados, nas suas mais diversas formas e técnicas de fabricação (SANTOS, 2001).

Na década de 50, eram poucas as indústrias brasileiras de cerâmica com produção acentuada. Na época, havia um maior número de olarias e, portanto, baixo consumo de matéria-prima. Foi o início da industrialização no país que proporcionou o maior desenvolvimento e a aceleração do êxodo rural, aumentando a produtividade do setor de construção civil. Esse fato originou uma evolução na indústria cerâmica que passou a ter uma maior competitividade, que, aliada à mecanização, aumentou o consumo de matéria-prima (SOARES et. al., 2002).

Em meados dos anos 60, houve uma mudança na escala de construção para habitação no Brasil, em virtude da criação do Sistema Financeiro de Habitação e do Banco Nacional da Habitação, despertando desta maneira a possibilidade de crescimento para toda a indústria nacional de materiais e componentes para a construção civil (SOARES et. al., 2002).

Na década de 80, houve uma ampliação do setor, ao mesmo tempo houve uma maior disseminação de empresas para outras regiões do país além dos pólos iniciais do Sul e Sudeste. Em meados dos anos noventa, o setor enfrentou problemas quanto à produção, em virtude da crise da dívida externa brasileira (e conseqüente retração do mercado da construção civil), recuperando-se apenas em 1992 (SOARES et. al., 2002).

Desde então, o setor vem passando por um crescente aperfeiçoamento em termos tecnológicos, gerenciais e de recursos humanos, além da criação de novos produtos cerâmicos. A tendência do crescimento de exportações, já constatada em meados dos anos

80, levou as empresas a investirem nas certificações de seus produtos em busca de níveis de qualidade internacionais (SOARES et. al., 2002).

O ramo de atividade das empresas de cerâmica vermelha é classificado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE como “indústria de transformação de minerais não metálicos” (DIAS, 2004b).

Os produtos de cerâmica vermelha agrupam, geralmente, os produtos para alvenaria (de vedação e estrutural), para cobertura e para canalizações. Dentre os de alvenaria, estão os tijolos e blocos. Os de cobertura são as telhas. Os tubos ou manilhas são aqueles utilizados para canalizações. Existem também produtos utilizados em lajes nervuradas (chamados lajotas), elementos vazados em alvenarias e algumas cerâmicas rústicas para revestimento de piso e também de paredes (chamados também de tijoleiras) (DIAS, 2004b).

O processo de fabricação dos produtos de cerâmica vermelha pode ser estruturado basicamente em seis etapas: 1.extração da matéria prima (argila); 2.preparação da matéria prima; 3.moldagem ou conformação das peças; 4.secagem das peças; 5.queima ou cozimento das peças; e 6.resfriamento das peças. O produto obtido desse processo é denominado de produto cerâmico ou genericamente de cerâmica (SANTOS, 2001).

Atualmente, no Brasil, as empresas produtoras de cerâmica vermelha somam 7.000 unidades fabris, com produção de 25,2 milhões blocos cerâmicos/ano e 4,6 milhões de telhas/ano, dando uma estimativa produzida de 64,2 milhões toneladas de cerâmica produzida por ano. O consumo de matéria-prima de argilas gira em torno de 82,3 milhões. A produção média de peças por empresa por mês está em 365.000, com faturamento R\$ 4,2 bilhões/mês, e 214 mil empregos diretos, segundo ABC (2003).

De fato, a cerâmica tem um papel importante para a economia do país, com participação no PIB (Produto Interno Bruto) estimado em 1%, correspondendo a cerca de 6 bilhões de dólares/ano ABC (2006).

Portanto, o setor produtivo de cerâmica vermelha representa um exemplo de atividade industrial com grande diversificação de materiais, com produção elevada, mas por outro lado concorre com substancial quantidade de resíduos gerados da fabricação. Dessa forma, tornam-se necessários estudos para o seu reaproveitamento.

2.3.2 Diagnóstico da geração dos resíduos cerâmicos

O diagnóstico da produção de telhas de cerâmica vermelha, apresentado por Dias (2004b) tendo como referência as regiões de Monte Carmelo e Ituiutaba, no Triângulo Mineiro / Minas Gerais, trazem à tona números significativos que justificam ações para a reciclagem dos resíduos da produção.

As cidades de Monte Carmelo e Ituiutaba estão localizadas no Triângulo Mineiro, em Minas Gerais, próximas de alguns grandes centros consumidores como Brasília, Goiânia, Belo Horizonte, Uberlândia, Uberaba e outros. A atividade industrial de cerâmica vermelha é tradicional nesses municípios, remontando seu crescimento ao tempo da construção da capital da república. O parque cerâmico existente no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba congrega mais de cem indústrias de cerâmica vermelha, segundo o Sindicato das Indústrias de Cerâmica e Olaria do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – SINCOTAP/Ituiutaba e a Associação dos Ceramistas de Monte Carmelo - ACEMC / Monte Carmelo. Na cidade de Ituiutaba, são dezesseis indústrias e, em Monte Carmelo cerca de quarenta, caracterizando dois importantes pólos industriais na região (DIAS, 2004b).

Nessas duas regiões, o consumo mensal de argila gira em torno de 122.000 m³; o consumo de lenha é de cerca de 75.000 m³, a produção de telhas de diversos tipos alcança números da ordem de 52 milhões de peças/mês. Na pesquisa realizada por Dias et. al. (2001), constatou-se que as indústrias admitem um valor médio de 3% representando as peças que são descartadas após a queima. Isto representa aproximadamente 1,6 milhões de peças/mês, ou 43 milhões de toneladas anuais. Segundo o autor, os resíduos gerados no processo de fabricação das telhas são peças que não apresentam, após a queima nos fornos, as características exigidas para a comercialização e também pedaços de telhas (cacos).

Tais estimativas de quantidade permitem vislumbrar um enorme campo de benefícios, constituindo-se em importante parâmetro para a decisão de se reciclar o resíduo.

Para quantificar o reaproveitamento dos resíduos, Dias (2004b) apresentou os seguintes dados: para a produção de casas populares na cidade de Ituiutaba, com um quantitativo em volume de ART de 385 m³/ mês, seria possível construir 19 casas de 44 m² por mês ou 231 casas de 44 m² ao ano. Enquanto isso, na região de Monte Carmelo com um quantitativo

em volume de 2.165 m³/mês, poderiam ser construídas 108 casas de 44 m² por mês ou 1299 casas de 44 m² anualmente.

Especificamente, para o emprego dos resíduos em camadas de pavimentos, Dias (2004b) informou que somente na região de Monte Carmelo, a extração de cascalho natural poderia ser reduzida em mais de 2.000 m³/ano, suprimindo o consumo para a execução de quase 11 km de base ou sub-base de pavimento.

Em síntese, nota-se que o reaproveitamento dos resíduos se ramifica em várias possibilidades, e que os quantitativos gerados são significativos e justificam estudos para viabilizar sua aplicação nos vários campos da construção civil.

Na Figura 2.1 ilustra-se a prática de descarte dos resíduos na periferia de Monte Carmelo.



Figura 2.1 – Localização de deposição clandestina de cacos de telhas na periferia da cidade de Monte Carmelo Fonte: Dias (2004b)

A quantidade de resíduos gerados (cacos) por mês, na região de Ituiutaba, é de 3,08% em média por produção, gerando um quantitativo de 239.439 cacos, com massa de 407 toneladas e volume de 545 m³ de cacos. Já na região de Monte Carmelo, apresenta-se em maior quantidade, perfazendo-se em média de 3% por produção, gerando um quantitativo de 1,35 milhões de cacos, com massa de 2.295 toneladas e volume de 3.072 m³ de cacos.

Analisando esses dados, Dias et. al. (2001) vislumbraram os seguintes benefícios com a reciclagem dos cacos de telhas: eliminação das despesas com o descarte; eliminação dos pontos de deposição clandestina; eliminação dos focos de problemas, com melhoria das condições de salubridade e visuais no entorno das cidades produtoras; redução da exploração de agregados naturais, com preservação das áreas de terras com potencial produtivo; instalação de nova atividade produtiva com geração de empregos; mudança cultural na cidade e região com valorização das atividades sustentáveis; benefícios sociais diversos, desde melhoria da infra-estrutura urbana à qualidade de vida e ainda, fonte de novos recursos, e não de despesas, para as indústrias.

Mas, para que haja a seleção de possíveis aplicações, levando em conta os aspectos tecnológicos, a caracterização dos resíduos se faz necessária, envolvendo aspectos químicos, físicos e mecânicos que irão interferir na qualidade e durabilidade das aplicações. É patente a necessidade do desenvolvimento de metodologias de reciclagem que permita o conhecimento sobre os resíduos e indique claramente o desempenho do processo em cada utilização pretendida, garantindo sua competitividade em termos de qualidade e não somente de custo.

2.3.3 Obtenção do agregado reciclado de telha

Dias (2004b) coletou 4.795 kg de cacos de telha em três indústrias da cidade de Monte Carmelo. Os cacos foram retirados de amontoados depositados nas indústrias visitadas através de máquinas carregadeiras disponíveis nos locais. O material coletado foi transportado para a cidade de Uberlândia, onde foi feita a primeira partida na central de britagem da empresa CMC, no Distrito Industrial de Uberlândia, utilizando o seguinte equipamento: Rebritador Cônico - FAÇO MOD. 60S, com capacidade de produção de 8 a 26 m³/h, possuindo fechamento mínimo: para grossos (1/2" ou 12,5mm); para médios (3/8" ou 10mm) e para finos (1/4" ou 6,3mm) e, a qual tem abertura máxima na boca de entrada: para grossos (4 1/2" ou 114,3mm); para médios (3" ou 75mm) e para finos (2" ou 54,8mm).

A segunda partida foi britada na empresa CTR/Araguaia na cidade de Uberlândia. O britador primário de mandíbulas possui classificação nas peneiras de 19 mm e 9,5 mm.

Na Figura 2.2 ilustra-se os agregados reciclados de telhas obtidos e utilizados.



Figura 2.2 – Agregado Graúdo Reciclado de telhas (ART)

2.4 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

Desde a década de 50, os pesquisadores da área da construção civil têm buscado alternativas para a obtenção de concretos mais duráveis e mais resistentes. Isso levou a investigações mais detidas sobre as propriedades dos agregados, que deixaram de exercer um papel apenas econômico na composição do concreto, mas passaram a representar uma alternativa, influenciando positivamente não só na trabalhabilidade, como nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, bem como na sua durabilidade (LEVY, 2001).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), existem várias características consideradas importantes e que devem ser estudadas para a utilização de agregados em concretos. Dentre elas, os autores citam a granulometria, a absorção de água, a forma e a textura, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes nos materiais. Quando se estuda a utilização de agregados para a produção de concretos, todas essas características devem ser levadas em consideração, principalmente quando se trata de novos materiais, como é o caso do agregado reciclado. Afinal, a viabilidade técnica de sua utilização dependerá do total conhecimento de seu comportamento na estrutura do concreto.

Assim sendo, o material a ser reciclado deverá ser trabalhado, levando-se em consideração os cuidados necessários, e obedecendo-se a uma seqüência de procedimentos, tais como, britagem, peneiramento e descontaminação, quando necessário, só então, poderá ser utilizado em várias obras, tais como aterros, drenagens de grandes áreas, materiais para base ou sub-base de pavimentos rodoviários e produção de novos concretos (LEVY, 2001).

Na Tabela 2-1, apresentam-se as principais características de três tipos de agregados reciclados, conforme sua origem, possibilidade de conter impurezas e potencial de resistência mecânica, segundo Levy (2001).

Tabela 2-1 – Classificação de agregados

Agregados provenientes de resíduos de alvenaria

Origem: são conseguidos a partir da britagem de fragmentos de materiais minerais, extraídos de materiais de demolição, ou resíduos de construção.

Impurezas: podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta, gipsita e outras substâncias em menor ou maior teor.

Resistência à compressão: é inferior à resistência a compressão de agregados naturais; poderão, ou não, conforme sua qualidade e sua granulometria, desenvolver reação pozolânica.

Agregados provenientes de resíduos de concreto

Origem: são conseguidos a partir da britagem de fragmentos de materiais minerais extraídos da demolição de estruturas de concreto fresco, endurecido ou rejeitado.

Impurezas: poderão estar contaminados por agentes agressivos como cloretos e ou sulfatos, dependendo somente da origem dos fragmentos. Podem ou não estar contaminados com resíduos de tinta.

Resistência à compressão: em geral, sua resistência à compressão dependerá da resistência à compressão dos agregados naturais utilizados na produção do concreto original.

Agregados provenientes de resíduos compostos

Origem: são conseguidos a partir da britagem de fragmentos de materiais minerais extraídos de demolição de obras convencionais, de estruturas de concreto e de vedações de alvenaria revestidas ou aparentes.

Impurezas: poderão estar contaminados por agentes agressivos, como cloretos e ou sulfatos, dependendo somente da origem dos fragmentos. Podem ou não estar contaminados também com resíduos de tinta.

Resistência à compressão: em geral sua resistência à compressão dependerá da resistência à compressão dos agregados naturais utilizados na produção do concreto original.

Em seu trabalho sobre o uso de agregado reciclado para a composição de concreto, Barra (1996) afirmou que “a maior heterogeneidade, a menor resistência da matriz (concreto

original) e a maior porosidade são consideradas as principais diferenças entre o agregado reciclado de concreto e o agregado natural”. Sendo que essas características podem ser aplicadas para os diversos tipos de agregados reciclados de construção e demolição disponíveis.

A seguir serão analisadas algumas das propriedades dos agregados que afetam, de alguma forma, a estrutura do concreto como: a composição granulométrica; a forma e textura das partículas; a massa específica; a massa unitária e a absorção.

2.4.1 Composição granulométrica

Uma das propriedades mais importantes para a análise do agregado reciclado é a composição granulométrica, pois ela influencia na confecção de argamassas e concretos.

Há várias razões para a especificação de limites granulométricos e da dimensão máxima dos agregados. A mais importante é a sua influência na trabalhabilidade e no custo.

Os métodos de ensaio para a composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos são apresentados pelas normas NBR 7211 (ABNT, 1983), NBR 7217 (ABNT, 1987) e NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Quando se trata de agregados, a dimensão máxima característica especificada pela norma da NBR 7211 (ABNT, 1983) é, em geral, designada pela dimensão da abertura da peneira, na qual fica retida uma porcentagem acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa das partículas do agregado.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994, p. 261), “quanto maior for a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume, que deve ser coberta pela pasta de cimento, para uma dada relação água/cimento”. Levando-se em consideração o preço do cimento, percebe-se que ele é, geralmente, bem mais caro (cerca de 10 vezes mais caro do que o preço do agregado), assim, compreende-se que qualquer ação que possa economizar o cimento sem reduzir a resistência e a trabalhabilidade do concreto pode converter-se em benefício econômico significativo.

Outra característica importante é o módulo de finura, que é representado por meio de um único índice obtido da distribuição granulométrica dos agregados, representado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em cada peneira da série normal, dividido por cem (100), e quanto maior o módulo de finura, mais graúdo é o agregado (HELENE; TERZIAN, 1992).

Para Lima (1999, p. 47), a granulometria dos agregados reciclados varia conforme o tipo de resíduo processado, o tipo de equipamentos utilizados, dentre outros fatores. A partir de seus estudos, o autor concluiu que, para a confecção das argamassas e concretos, a distribuição granulométrica influencia na trabalhabilidade, na resistência mecânica, no consumo de aglomerantes, na absorção de água, na permeabilidade, etc. Destacou ainda que a curva granulométrica é característica específica de cada tipo particular de resíduo reciclado e que, para o uso de reciclados em concretos e argamassas deve-se fazer o peneiramento do material, procurando-se obter curvas similares às da areia e pedra convencionais.

Por outro lado, o autor alerta para o fato de que esse procedimento pode ocasionar desperdícios de parcelas do reciclado, acarretando dificuldades técnicas e, conseqüentemente, gerando o aumento do custo da reciclagem. Assim sendo, a reciclagem pode ser desenvolvida de maneiras e escalas diferentes: “na recuperação de resíduos de alvenaria para produção de argamassa em obras particulares; na recuperação de resíduos de concreto por construtoras e concreteiras de pequeno, médio e grandes portes e na reciclagem de resíduos diferenciados por centrais de reciclagem públicas ou particulares, de vários portes” (LIMA, 1999, p. 47).

Uma outra contribuição extremamente relevante da obra de Lima, (1999) refere-se à descrição completa que apresenta, sobre a granulometria dos reciclados, usados na produção de concreto e argamassas. Segundo sua descrição, há diversos fatores que podem influenciar a granulometria de reciclados, o que pode alterar o resultado final da

confeção de concretos e argamassas, provocando mudanças tanto em sua trabalhabilidade quanto em sua resistência³.

2.4.2 Forma e textura das partículas

De acordo com Coutinho (1997a), na confecção dos concretos, a forma das partículas desempenha papel preponderante, uma vez que atua diretamente na trabalhabilidade, bem como na compactidade, ângulo de atrito interno e na indispensável quantidade da água de amassamento (necessária para a mistura do concreto).

Mehta e Monteiro (1994, p.266) partiram de uma avaliação puramente visual para determinar o quanto a textura superficial do agregado é lisa, áspera ou celular. Assim, os autores definiram que a areia e o pedregulho possuem formas lisas em seu estado natural, enquanto as pedras britadas de granito, basalto e calcário apresentam texturas ásperas. Declaram também que os agregados com superfície celular e áspera absorvem mais água do que os agregados de superfície lisa.

Corroborando com as idéias de Mehta e Monteiro, Leite (2001, p.66), com base nos estudos de Hamassaki et al. (1996) e de Morel et al. (1993), apresenta uma análise dos agregados reciclados, e mostra que estes são, em geral, mais rugosos e porosos do que os agregados naturais. O que confere aspereza ao agregado reciclado é a argamassa aderida das partículas do material ou o próprio material cerâmico. Esta autora menciona que a rebitagem do material, “poderia favorecer a redução da porosidade do mesmo, principalmente no caso do agregado reciclado de concreto, pois este procedimento ajudaria a diminuir a quantidade da argamassa aderida à superfície. Todavia, o custo do beneficiamento aumentaria muito”. Deve-se também considerar que a rebitagem, neste caso, provocaria maior produção de finos, cujo interesse deve ser verificado.

Ainda segundo Leite (2001, p.67), quando se incorpora o agregado reciclado ao concreto, a mistura fica mais coesa, resultando em uma menor trabalhabilidade, comparado ao mesmo concreto feito a partir de agregado natural. Declara que, “existe aí uma desvantagem do uso de agregados reciclados, pois os grãos necessitam de mais pasta de cimento para

³ Para maiores detalhes sobre a descrição acerca da granulometria, ver Lima (1999, p. 50)

produzir misturas mais trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto”. Por outro lado, positivamente, a sua textura mais rugosa e sua maior angulosidade concorrem para a melhoria da aderência pasta/agregado, porque o material reciclado possui maior área específica, assim conseguindo uma maior aderência entre a argamassa e o agregado. Também favorece o material, a maior absorção da pasta de cimento pelos poros superficiais do agregado, ao se comparar com material natural usado correntemente. Conseqüentemente, pode haver maior precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado, o que resultará no fechamento da zona de transição do concreto que, por sua vez, finalmente poderá ocasionar um benefício no desempenho do concreto.

Apresenta-se na Tabela 2-2 a classificação das formas das partículas dos agregados, segundo Neville (1997).

Tabela 2-2 – Classificação da forma de partículas

Classificação	Descrição	Exemplos
Arredondado	Completamente erodido por água ou por atrito	Seixos de rio ou de praia; areias de rio, de praia e areias transportadas pelo vento.
Irregular	Irregularmente naturais ou parcialmente modificadas pelo atrito, com arestas arredondadas.	Outros seixos, como de cava.
Lamelar	Material em que a espessura é pequena em relação às demais dimensões.	Rocha lamelar
Anguloso	Com arestas bem definidas formadas na intersecção de faces aproximadamente planas.	Pedras britadas de todos os tipos; escória britada, talus.
Alongado	Material, geralmente anguloso, em que uma das dimensões é bem maior que as demais.	
Lamelar e Alongado	Material que tem o comprimento bem maior do que a largura e esta bem maior que a espessura.	

Na opinião de Levy (2001), para obtenção de agregados para diversos fins, assim como para a produção de concretos, requer o estabelecimento prévio de critérios granulométricos. Além disso, não se pode deixar de considerar a forma e a textura dos

grãos, uma vez que as formas menos arredondadas (mais angulares) e mais porosas requerem maiores consumos de água na produção das argamassas e dos concretos.

Há de se considerar, também, que a forma e a textura influenciam mais nas propriedades do concreto fresco do que do endurecido. As partículas de texturas ásperas, angulosas e alongadas consomem mais pasta de cimento do que as partículas de texturas lisas e arredondadas, no que se refere à produção de misturas de concreto, o que gera um aumento em seu custo final (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.4.3 Massa específica e massa unitária

Dando seqüência aos estudos das propriedades dos agregados naturais e reciclados, é importante conhecer também a massa específica e a massa unitária, na aplicação das argamassas e concretos. Com relação à massa específica, autores como Mehta e Monteiro (1994, p. 257) afirmam que é importante que se tenha conhecimento do volume ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas e definem a massa específica como “a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas”.

A maior parte dos agregados naturais possui valores de massa específica que variam entre 2600 a 2800 kg/m³, os quais são mostrados na Tabela 2-3. Para os agregados artificiais, os valores variam muito abaixo dos valores da tabela seguinte (NEVILLE, 1997).

Tabela 2-3 – Massa específica de diversos grupos de minerais

Grupo	Massa específica (kg/m³)	Intervalo de variação
Basalto	2800	2600 a 3000
Sílex	2540	2400 a 2600
Granito	2690	2600 a 3000
Arenito	2690	2600 a 2900
Hornfel	2820	2700 a 3000
Calcário	2660	2500 a 2800
Pórfiro	2730	2600 a 2900
Quartzito	2620	2600 a 2700

Fonte: Neville (1997)

Por outro lado, sabe-se que tanto as massas específicas quanto as massas unitárias dos agregados reciclados, normalmente, apresentam valores inferiores aos dos agregados naturais empregados usualmente na produção dos concretos. Bazuco (1999) analisou que, conforme a origem e a granulometria dos reciclados, os valores de suas massas específicas podiam variar de 5% a 10% mais baixos do que os valores apresentados pelos agregados naturais. Também Barra (1996), em sua pesquisa sobre os agregados reciclados de concreto e de material cerâmico obteve valores das massas específicas, conforme mostra a Tabela 2-4, indicando uma redução das massas específicas na proporção de 16 % a 30 %. Isto ocorreu em decorrência do tipo do material reciclado, ou seja, quanto mais poroso o material, menor seria sua massa específica.

Tabela 2-4 – Massa específica dos agregados reciclados em função do componente e da faixa granulométrica utilizada

	Frações	γ_s (kg/dm ³)	γ_{sss} (kg/dm ³)
Concreto	12 – 20 mm	2,270	2,427
	6 - 12 mm	2,238	2,406
Material cerâmico	12 - 20 mm	1,870	2,141
	6 - 12 mm	1,866	2,135

γ_s – massa específica do material seco; γ_{sss} – massa específica do material saturado superfície seca

Fonte: Barra (1996)

Nessa mesma temática, Neville (1997) informa que a massa específica trata somente do volume das partículas individualmente, e, naturalmente, não seria possível conseguir uma disposição dos agregados, de tal forma que não houvesse espaços vazios entre suas partículas. Quando se propõe a estudar o concreto, é necessário saber como o agregado deve ser dosado em volume. Assim, deve-se conhecer qual a massa de agregado que ocupa um recipiente com capacidade unitária, para que se possa converter essa “massa unitária do agregado” em quantidades expressas em volume. Conforme as partículas vão se ajustando, elas vão se distribuindo em tamanhos e dando forma, devido serem adensadas. Nesse sentido, Neville (1997, p.133) declara que “as partículas de um tamanho único somente podem ser adensadas até certo limite, mas partículas menores podem se juntar acomodando-se nos vazios entre as maiores, aumentando assim a massa unitária do

material adensado”. O autor conclui, ainda, que “a forma das partículas tem grande influência sobre a compacidade de arrumação das partículas que pode ser obtida”.

Nessa mesma perspectiva, Mehta e Monteiro (1994, p.257) afirmam que a massa unitária “é definida como a massa das partículas do agregado que ocupa uma unidade de volume. O fenômeno da massa unitária surge, porque não é possível empacotar as partículas dos agregados juntas, de tal forma que não haja espaços vazios”. Os estudos desenvolvidos por esses autores mostraram que os agregados graúdos reciclados de concreto possuíam massa unitária de $1,16 \text{ kg/dm}^3$, enquanto que as massas unitárias dos agregados naturais variavam entre $1,30$ a $1,75 \text{ kg/dm}^3$. Da mesma forma, Lima (1999) registrou que pesquisadores da empresa INFORMAÇÕES E TÉCNICAS EM CONSTRUÇÃO CIVIL LTDA (doravante I&T), estudaram o reciclado de alvenaria “brita corrida”, gerados em Santo André, e encontraram em média a massa unitária na ordem de 1.600 kg/m^3 (I&T, 1991).

Entretanto, no que se refere aos agregados leves naturais, Mehta e Monteiro (1994, p. 248) menciona que estes “são produzidos através do beneficiamento de rochas ígneas vulcânicas como punicita, escória ou tufo”. Descreve também que os agregados sintéticos “podem ser fabricados por tratamento térmico de uma variedade de materiais, por exemplo, argila, folhelhos, ardósia, datolita, perlita, vermiculita, escória de alto-forno e cinza volante”. Para esses agregados ou outros, que se assemelham a essa estrutura, segundo o autor, a massa unitária é inferior a 1120 kg/m^3 , sendo considerados agregados leves. Declara, ainda, que existem agregados geralmente fracos adequados para a produção de concretos não estruturais, e, além disso, existem os agregados leves, menos porosos, que em sua estrutura possuem poros finos uniformemente distribuídos, que podem ser aplicados na produção de concretos estruturais.

2.4.4 Absorção

Uma das grandes dificuldades encontradas para a produção de concreto com agregado reciclado é a definição do consumo de água, devido à característica do agregado reciclado, que apresenta absorção de água bem mais elevada do que os agregados naturais, e isso exerce influência direta e imediata na produção dos concretos. Alguns pesquisadores estudam a fenomenologia dos agregados reciclados, sua porosidade, seu formato e rugosidade, porque estas propriedades caracterizam e influenciam diretamente em sua

capacidade de absorção. No que tange aos agregados naturais, a taxa de absorção de água não exerce quase nenhum tipo de influência nas misturas de concreto, pois esses agregados apresentam pouca ou nenhuma porosidade (BARRA, 1996; LEITE, 2001; LEVY, 2001; LIMA, 1999, etc).

Barra (1996, p.84) manifesta pontos de vista acerca da absorção de água dos agregados graúdos reciclados quando o material é adicionado diretamente à pasta de cimento, ou à argamassa. Além de mostrar que a absorção não ocorre uniformemente, a autora nos informa também que ela “se dará principalmente na zona de contato entre a pasta e o agregado, ou entre a argamassa e o agregado, variando, assim, a relação água/cimento da mistura de concreto, havendo um potencial decrescente da pasta, ou argamassa, até a superfície do agregado”. Barra observou ainda que as características do agregado e a consistência da pasta, ou argamassa, são de fundamental importância para a definição da quantidade de água que será absorvida pelo agregado, a partir da mistura do concreto. Conseqüentemente, quanto mais seco, poroso e de menor dimensão for o agregado, e quanto maior a fluidez da pasta, ou argamassa, maior será a quantidade de água absorvida. Entretanto, se o agregado seco ao ar é misturado primeiramente com a água, ocorre maior absorção de água pelo agregado antes da mistura do concreto; e a probabilidade de o agregado absorver água da mistura é muito menor, pois as partículas já estarão quase saturadas, podendo inclusive ocorrer o fenômeno inverso, ou seja, o agregado devolver parte da água absorvida para a mistura e haver um aumento na a/c final.

Vários autores recomendam o uso dos agregados reciclados na condição saturada, devido à maior absorção dos reciclados, para evitar que o agregado retire água da pasta, que é necessária para a hidratação e o ganho de resistência (HANSEN, 1992; LIMA, 1999; SCHULZ & HENDRICKS, 1992 e outros). Knights (1998) concluiu, em seu estudo com agregado reciclado, que nem toda água necessária era absorvida durante a pré-umidificação dos agregados antes das misturas do concreto. De acordo com seus relatos, o agregado reciclado deverá ficar imerso em água por apenas 10 minutos, não sendo necessárias 24 horas de imersão. Sua pesquisa sugere, assim, uma alta redução da taxa de absorção relativa.

Lima (1999, p.43), referindo-se a pesquisas relatadas pelo I&T (1995), apresenta os seguintes resultados sobre ensaios de determinação de absorção e de tempo de saturação de

reciclados de diferentes composições, no que se refere aos compostos de argamassa e concreto e de compostos de materiais cerâmicos e argamassa. Conforme sua descrição,

os resíduos foram triturados em britador de mandíbula e peneirados em malhas ½” e ¼” antes dos ensaios. Todas as amostras apresentaram saturação máxima antes de 15 minutos. Em função disso foram realizados outros ensaios para determinação da evolução da absorção no tempo [...]. Após imersão de 5 minutos as amostras atingiram pelo menos 95 % da absorção máxima (exceto uma, que atingiu 89 % da absorção máxima). Os resultados dos ensaios levam à conclusão que este tempo de saturação é suficiente para a pré-umidificação dos agregados, na preparação de concretos.

Apresentam-se na Tabela 2-5 os valores da absorção de água encontrados em I&T (1995).

Tabela 2-5 – Absorção de água de agregados reciclados de diferentes composições

Reciclado com predominância de	Absorção de água
Argamassas, concretos e blocos de concreto.	3 a 8
Argamassas e materiais cerâmicos	6 a 11
Argamassas e tijolos cerâmicos maciços	12 a 18

Fonte: I&T (1990) apud Lima (1999)

Lima (1999) apresenta uma série de observações críticas referentes à absorção de água de agregados reciclados; dentre elas destacam-se as seguintes:

1. O agregado reciclado apresenta absorção de água maior que o agregado natural, característica que, se não for observada, poderá acarretar prejuízo à durabilidade e dificultar a produção de argamassas e concreto.
2. É recomendado que o material reciclado seja umidificado antes de ser usado, para a garantia da cura satisfatória das argamassas e dos concretos, pois há possibilidade de o agregado absorver a água da hidratação do cimento.
3. Admite-se, conforme a composição do material, que o tempo de pré-umidificação do reciclado pode ser relativamente pequeno, de aproximadamente, cinco minutos.

De acordo com os ensaios relatados pelo autor, o agregado pode alcançar 95% da absorção máxima.

4. As taxas de absorção dos agregados reciclados de alvenaria são maiores do que as dos reciclados de concreto, devido à maior porosidade do resíduo, ou seja, agregados reciclados de alvenaria absorvem mais água do que os agregados reciclados de concretos.
5. Agregados reciclados de alvenaria apresentam altas taxas de absorção, superiores a 15%, como os componentes cerâmicos para alvenaria de vedação.

Observa-se que, quanto menor o diâmetro do agregado e maior a sua porosidade, obter-se-á conseqüentemente maior taxa de absorção, como demonstra Barra (1996) em sua pesquisa. Conforme se visualiza na Tabela 2-6, os dados encontrados pela autora de taxa de absorção dos agregados reciclados.

Tabela 2-6 – Taxas de absorção de agregados reciclados em função do tipo de componente e da granulometria

Componente reciclado	Frações	Absorção(%)¹
Concreto	12 -20 mm	6,85
	6-12 mm	7,49
Material cerâmico	12-20 mm	14,5
	6-12 mm	14,4

1- capacidade de absorção do material calculada em função da massa do material seco em estufa.

Fonte Barra (1996)

Devenny e Khalaf (1999) encontraram valores de taxa de absorção de agregados de tijolos cerâmicos britados, que variaram de 5 a 15 % em relação à massa do material seco. Em seu estudo, os pesquisadores avaliaram quatro tipos de tijolos diferentes em relação à resistência à compressão. A partir dos resultados de testes prévios que definiram que a diferença de absorção do material dos 30 minutos até as 24 horas era de apenas 2 %, os autores concluíram que seria necessário compensar a absorção de água do material, deixando-se esse material submerso por um período de 30 minutos, antes de produzir a mistura de concreto.

Outras pesquisas surgiram em Hong Kong, sobre o estudo da influência dos estados de umidade dos agregados naturais e reciclados nas propriedades dos concretos frescos e endurecidos, especificamente para a análise da consistência (*Slump*) e da resistência à compressão dos concretos. Os pesquisadores Poon et.al. (2004) prepararam misturas de concretos em proporções diferentes de agregados naturais e reciclados e colocaram os agregados reciclados em diferentes estados de umidade, no estado seco ao ar, seco em estufa e saturado com superfície seca. Nos experimentos, os concretos foram produzidos e curados nas idades 3, 7 e 28 dias. O agregado graúdo natural era granito britado e o reciclado foi obtido de concreto reciclado britado, gerado pela atividade de demolição de edifícios e de pistas de decolagem de concreto. As misturas dos concretos foram preparadas em proporções diferentes de agregados graúdos reciclados: 100% natural; 80% natural + 20% reciclado; 50% natural + 50% reciclado e 100% reciclado. Os autores observaram que os estados de umidade dos agregados afetavam o comportamento dos concretos frescos e revelaram que os concretos feitos com agregados secos em estufa conduziram a um *slump* inicial mais elevado e a uma perda mais rápida em sua consistência. Enquanto que os concretos produzidos no estado saturado de superfície seca e seco ao ar apresentaram consistência e perdas iniciais normais no *slump*. No que se refere ao estado endurecido, os resultados mostraram que os concretos produzidos com agregados secos ao ar apresentaram resistência à compressão mais elevada do que os agregados no estado seco em estufa e os agregados no estado de superfície saturada seca.

Como se pode observar, vários pesquisadores têm dúvidas quanto ao emprego e à quantidade efetiva de água que o concreto irá consumir, justamente quando se processa a mistura da pasta de cimento com agregado. Mesmo sendo definida a absorção do agregado reciclado, ainda não se encontrou uma metodologia que forneça respostas exatas para as essas dúvidas. Ademais, para cada tipo de material reciclado deve-se observar qual será quantidade de água que o agregado irá absorver na hora da mistura da pasta para se fazer o concreto, o que é muito difícil de se medir. Conclui-se, portanto, que, de uma maneira geral, quando se processa a mistura do concreto, cada um de seus constituintes tende a consumir água livre, o que torna improvável uma estimativa sobre o quanto cada parte irá consumir de água.

Com base nesses fatos observados por Poon et. al. (2004), buscou-se diagnosticar, nesta pesquisa, o agregado reciclado de telha, no estado seco ao ar, pois esses autores mostraram

que, quando se emprega o agregado reciclado seco ao ar, obtêm-se resistências superiores àquelas com os agregados secos na estufa e no estado saturado superfície seca.

2.4.5 Resistência mecânica do agregado

O concreto é constituído por uma mistura de aglomerante que forma a pasta endurecida, agregado miúdo e agregado graúdo, ou seja, fragmentos de pedras. Isso significa que a resistência do concreto depende da resistência dos seus componentes (NEVILLE, 1997).

Mehta e Monteiro (1994) relatam que a influência do agregado na resistência do concreto não é levada em conta. Afirmam que a resistência do agregado natural não é normalmente um fator determinante na resistência do concreto, pois a partícula do agregado é mais resistente que a matriz e a zona de transição e a ruptura se dá nessas duas fases. Com exceção, para o caso dos agregados leves, segundo os autores, pois influem, além da resistência do agregado, a forma, a textura da superfície, a granulometria (distribuição granulométrica) e a mineralogia, na resistência do concreto em seus vários níveis. Para os agregados naturais, os valores de resistência à compressão dos granitos, basaltos, arenitos quartzíticos e calcários estão na faixa de 210 a 310 MPa.

Neville (1997) declara que a resistência do concreto não pode ser significativamente maior do que a maior parte do agregado de que é constituído; caso o agregado apresente resistência baixa, isso fica evidenciado pelas inúmeras partículas de agregado rompidas e visíveis na superfície originada pelo rompimento dos corpos-de-prova. Logo aponta que a resistência do agregado é menor que a resistência nominal do concreto, e que é um fator limitante para obtenção de resistências mais elevadas.

Cachim et. al. (2006), em Aveiro-Portugal, avaliaram as propriedades de concretos com resíduos de tijolos furados. Foram utilizados dois tipos de tijolos (A e B). Na Tabela 2-7 apresentam-se os resultados de resistência à compressão dos tijolos A e B.

Tabela 2-7 – Resistência mecânica do agregado de tijolos

Propriedades	Tijolo A	Tijolo B
Resistência à compressão (MPa)	1,77	2,55
Tempo de cozedura (°C)	850-870	800-850

Os resultados da Tabela 2-7 indicam que o tijolo B possui resistência à compressão 50% superior à do tijolo A. Os autores informam que o tempo de cozadura, isto é, as temperaturas em que foram cozidos os tijolos, influenciam nos resultados finais das resistências dos tijolos. Os resultados de resistência dos concretos foram sempre maiores quando utilizaram o agregado do tijolo B. Concluíram que a substituição de 10% do agregado natural pelo reciclado de tijolo conduziu a concretos com resistências equivalentes.

Bicca (2000, p.17) comenta que “a resistência do concreto não depende apenas da resistência mecânica do agregado. Muitas vezes a resistência do agregado é avaliada, de forma indireta, pelo desempenho no concreto no qual foi empregado”.

Dessa forma, a resistência dos grãos do agregado, propriamente dita, não foi determinada pelos pesquisadores, nos trabalhos consultados, talvez pela dificuldade de realizar os ensaios em corpos de prova com diminutas dimensões, como é o caso das partículas dos agregados para concreto.

2.4.6 Características do ART

Como já foi relatado aqui, o agregado reciclado de telha (ART) utilizado nesta pesquisa é oriundo da pesquisa desenvolvida por Dias (2004). A avaliação que este autor fez neste caso foi para emprego do agregado em camadas de pavimentos. Diversas propriedades do material foram investigadas e, embora aqui o estudo seja para emprego em concreto, essas propriedades trazem informações importantes sobre o material quando comparadas com valores referenciais recomendados pelas normas ou encontradas em outras pesquisas com materiais naturais. Dessa forma, apresentam-se aqui os resultados obtidos por Dias (2004) para o agregado reciclado de telha, referentes às seguintes características: resistência à abrasão Los Angeles; resistência ao esmagamento; perda ao choque no aparelho Treton; índice de degradação após o Proctor; desgaste após fervura e potencial pozolânico.

Na Tabela 2-8 apresentam-se os resultados de dois agregados reciclados caracterizados por Dias (2004b), denominados ART-1 e ART-2.

A observação assinalada na Tabela 2-8 para o sobrescrito 1 refere-se ao ensaio de determinação de resistência à abrasão Los Angeles, realizado segundo a Norma NBR 6465/84 e pelo método da norma DNER-ME 222/94. O valor da resistência à abrasão Los Angeles, obtido por Dias (2004b) foi de 41%, observando-se que não representa um valor negativo, pois comparado com alguns materiais naturais representa valor de mesma ordem de grandeza.

Tabela 2-8 – Propriedades caracterizadas no ART

Materiais	Propriedades	Resultados	Método de ensaio
ART-1	Resistência Abrasão Los Angeles ¹	40,5 %	NBR 6465 (1984)
		36,3 %	DNER-ME 222/94
ART-2	Resistência Abrasão Los Angeles	35,5 %	NBR 6465 (1984)
		35,5 %	DNER-ME 222/94
ART-1	Resistência ao esmagamento ²	36,7 %	NBR 9938 (1997)
ART-2	Resistência ao esmagamento	33 %	NBR 9938 (1997)
ART-1	Perda ao choque no aparelho Treton ³	41,2 %	Brasil (1998)
ART	Índice degradação após o Proctor ⁴	14,4 %	Brasil (1998)
ART-1	Desgaste após fervura ⁵	4,3 %-Peneira nº 10	Brasil (1998)
		2,6 %-Peneira nº40	Brasil (1998)
ART-2	Desgaste após fervura	3,3 %-Peneira nº10	Brasil (1998)
		0,4 %-Peneira nº10	Brasil (1998)
Amostra-1	Potencial Pozolâmico ⁶	235,8 mg	Chapelle (IPT)
Amostra-2		288,5 mg	

O sobrescrito 2 se refere à resistência ao esmagamento, que foi determinada pela norma NBR 9938 (ABNT, 1997), com valores limites indicados por Brasil (1998). Nesse quesito, o material também não foi avaliado negativamente.

O sobrescrito 3 se refere à Perda ao choque no aparelho Treton, afirmando o autor que o resultado não foi uma característica negativa comparada com o limite de tentativa indicado por Brasil (1998), de perda $\leq 60\%$.

O sobrescrito 4 indica o Índice de degradação após o Proctor e verifica-se que nesse ensaio o ART apresenta deficiência de desempenho quando comparada com o limite de tentativa sugerido por Brasil (1998), em que o limite é de 6% (para melhores esclarecimentos consultar a tese de Dias (2004b, p.149)). No entanto, ressalta-se que nesse caso os esforços aplicados no material são dinâmicos.

O sobrescrito nº 5 refere-se ao ensaio de desgaste por fervura e, segundo o autor, os resultados atingiram os limites de tentativa indicados por Brasil (1998). Esse ensaio revelou-se o material cerâmico foi calcinado convenientemente para tornar-se resistente.

Finalizando, o sobrescrito 6 está se referindo ao potencial pozolânico do ART, para o que foi realizado o ensaio Chappelle, conforme certificado de ensaio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT-SP e o ensaio de curvas de difração de raios X. Os materiais cerâmicos com um consumo mínimo de 330 mg de CaO/g, segundo a literatura, têm potencial pozolânico que pode ser aproveitado; as amostras preparadas e analisadas pelo ensaio Chappelle apresentaram potencial pozolânico limitado, devido ao baixo consumo de Cao obtido, ou seja abaixo de 299 mg.

No ensaio de raios X, os resultados indicaram a redução dos picos por volta de $2\theta \approx 13^\circ$ e $2\theta \approx 25^\circ$, evidenciando a amorfização da caulinita. Em resposta pode-se concluir que o ART apresenta potencial pozolânico, ainda que baixo, mas para o aproveitamento dessa característica o assunto deve ser mais investigado, levando em consideração que esse potencial somente é ativado para superfícies específicas muito elevadas, o que não é o caso do agregado graúdo estudado neste trabalho. Dessa forma, embora o potencial de pozolanidade possa ser importante no uso em concreto, pois pode contribuir para o aumento da resistência e para a diminuição da permeabilidade, enquanto reage com o hidróxido de cálcio. Considera-se não ser provável que haja alguma reação no concreto estudado, pois a finura é um fator importante para permitir a reação, ficando, então, como curiosidade para futuras pesquisas, em que se queiram avaliar os finos do ART.

2.5 ALGUMAS NORMAS RELACIONADAS AOS AGREGADOS RECICLADOS

Alguns pesquisadores da área proferem que a normalização tradicional revela-se restritiva e limitante, que os métodos precisam ser modificados e substituídos, para que sejam mais bem analisadas as propriedades dos materiais alternativos (JOHN; ÂNGULO, 2004).

Citam-se a seguir algumas normas mencionadas por alguns autores, como Levy (2001) e Carrijo (2005), relacionadas aos resíduos da construção e demolição.

- A Norma Holandesa CUR (1986)⁴ e a norma NEM 5905:1997 especificam os agregados reciclados segundo critérios de qualidade (Formato das partículas, porcentagem de miúdos, distribuição granulométrica, massa específica, etc.).
- A Danish Concrete Association (Dinarmarca) publicou algumas recomendações envolvendo reciclados de concreto. Os agregados reciclados foram divididos em duas classes: Classe GP1 - Agregados reciclados com massa específica superior a 2200 kg/m³, contendo basicamente resíduos de concreto com pequena quantidade de alvenaria, que podem ser utilizados para concreto armado e não armado à classe passiva ou moderada com resistências de até 40 MPa; Classe GP2 – Agregados reciclados com massa específica superior a 1800 kg/m³, contendo reciclados de concreto e alvenaria ou somente alvenaria, que podem ser utilizados para concreto armado ou não-armado, em ambientes pertencentes à classe passiva com resistências de até 20 MPa.
- E outras como: A proposta japonesa de normalização BCSJ de (1977)⁵, a Norma Britânica 6543, as diretrizes da RILEM TC 121 DRG, apresentadas no 3º Simpósio Internacional sobre Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria (1993)⁶, o

4 Commissie voor Uitvoering van Research CUR Betonpuingranulaaten Metselwerkpuins Granulaat als Toeslagsmaterial van Beton. Commissie voor Uitvoering van Research ingesteld door de Betonvereniging, Rapport 125, 1986

5 JAPAN BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN B.C.S.J. Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste 1977.)

6 RILEM TC 121-DRG RILEM RECOMMENDATION Specifications for concrete with recycled aggregates Materials and Structures. 27, p. 557 – 559. 1994.

Relatório do comitê CEN 154 AHG - Recycled Aggregates (VAZQUEZ, 1997), e ainda, na Alemanha, algumas normas para a utilização de agregados reciclados de concreto, como por exemplo, DIN – 1045 “Concrete and Reinforced Concrete”.

No âmbito nacional, Lima (1999) apresentou algumas sugestões e alguns vetos a determinados usos, para regulamentação dos agregados provenientes da reciclagem.

Em 2001, foram constituídos pela ABNT dois Grupos de Trabalho para preparação de textos básicos visando à elaboração de documentos intitulados “práticas recomendadas para a utilização de agregados reciclados” um em pavimentação e o outro em concreto.

- A norma NBR 15116 – Projeto 18:201.06-001 - “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil-Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural”, que atende à Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002. Esta norma estabelece os requisitos para emprego de agregados reciclados, a partir de resíduos sólidos da construção civil, que são divididos em 4 classes (A, B, C e D). A classe A classifica resíduos reutilizáveis ou recicláveis, como: resíduos de construção, demolição, reformas, e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros), argamassa, concreto, e resíduos de processo de preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, e outros), produzidas nos canteiros de obras.

A normalização para especificar os resíduos sólidos, para emprego de agregados reciclados em concreto no Brasil está começando a avançar nas pesquisas. A colaboração das universidades e seus pesquisadores poderão contribuir de forma efetiva, para que se tenham novas alternativas, podendo assim, minimizar os impactos ambientais.

No próximo capítulo, serão discutidos os aspectos para a produção e as propriedades avaliadas no estudo dos concretos com agregados reciclados.

CAPÍTULO 3

CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo introduzem-se as considerações gerais, com a abordagem teórica da metodologia da dosagem empregada, além disso, incluem-se fundamentos relativos a concretos leves, após uma visualização das propriedades que afetam na estrutura do concreto e um breve relato da estrutura interna do concreto.

3.2 ASPECTOS SOBRE A DOSAGEM DE CONCRETO

A dosagem do concreto é um processo com o qual se obtém uma ótima proporção entre o cimento, agregados, água e aditivos, para atender a determinadas especificações. O trabalho de dosagem é o primeiro passo para se produzirem concretos dentro de condições controladas.

As principais propriedades do concreto endurecido são normalmente expressas pelo projetista das estruturas, enquanto que as propriedades do concreto fresco são determinadas pelas técnicas de execução – transporte, lançamento e adensamento do concreto, assim como pelas próprias características geométricas da estrutura a ser concretada. Por isso, necessita-se conciliar essas exigências para satisfazer a ambas, através de concreto o mais econômico possível.

Não se tem neste trabalho a pretensão de fazer um estudo profundo de dosagem dos concretos, mas empregarem-se procedimentos consagrados de dosagem com intuito de

definição de traços de referência. No estudo de dosagem, será adotada a metodologia do IPT-EP/USP (HELENE e TERZIAN, 1992) que consiste em construir um diagrama de dosagem correlacionando a resistência à compressão, a relação água/cimento (a/c), a composição (1: m) e a quantidade de cimento. O estudo é feita experimentalmente e primeiramente, determina-se o teor de argamassa para o traço 1:5 (denominado Traço Normal), fixando o abatimento e variando a relação a/c , até a obtenção da menor relação água/cimento para o teor de “argamassa ideal”.

Como se nota, esta é uma das fases mais importantes do estudo de dosagem, pois é a que determina a adequabilidade do concreto quando lançado na forma. Helene e Terzian (1992) afirmam que a falta de argamassa na mistura acarreta porosidade no concreto e falhas de concretagem, já o excesso proporciona um concreto de melhor aparência, mas aumenta o custo por metro cúbico como também o risco de fissuração por origem térmica e por retração de secagem. Portanto, o primeiro objetivo é determinar o teor ideal de argamassa na mistura do concreto (mínimo possível). Para tal, através de variações no teor de argamassa da mistura, com o traço estabelecido em 1:5, determina-se a proporção adequada por tentativas e observações práticas.

A nova etapa do estudo de dosagem é produzir mais dois traços auxiliares, para possibilitar a montagem do diagrama de dosagem. Os dois traços escolhidos apresentam uma variação de uma unidade e meia no teor de agregado total, para mais e para menos, em relação ao traço 1:5, denominado Normal. Os dois novos traços manterão fixo o teor de argamassa (α) e o abatimento do tronco de cone, determinados para o traço 1:5.

Assim definidos, os traços auxiliares 1:3,5 e 1:6,5, calcula-se, após a relação dos agregados miúdo e gráudo seco/cimento em massa (a, p) para complementar o traço Rico e traço Pobre, ficando o traço 1: $a: p$.

Com esse procedimento, formam-se famílias de concreto, que segundo Levy (2001) são famílias que tratam de uma série de concretos moldados com um teor de argamassa constante, com o objetivo de se realizar o estudo de determinada propriedade. Então, só há sentido em comparar a tendência apresentada pela família de concreto com outra família para evitar erros de interpretação.

Finalmente, com os concretos produzidos e os corpos-de-prova preparados, seguindo as normas pré-estabelecidas pela ABNT, parte-se para o rompimento dos corpos-de-prova dos concretos de referência e dos reciclados e com os esses resultados obtidos, são feitas as devidas análises comparativas.

O método do IPT e EPUSP é um método semi-experimental, em que há parte experimental de laboratório precedida por uma parte analítica de cálculo baseada em leis de comportamento dos concretos. Essas leis são calculadas pelo método dos mínimos quadrados, em que são adotados pelos seguintes modelos que governam a interação das principais variáveis: a Lei de Abrams (1918) apud Helene e Terzian (1992), a Lei de Lyse (1932) apud Helene e Terzian (1992) e a Lei de Molinari (1974) apud Helene e Terzian (1992) que são mostrados nas equações abaixo.

$$f_{cj} = \frac{K_1}{(K_2)^{a/c}} \quad 3.1$$

Onde: “Lei de Abrams”

f_{cj} = resistência à compressão axial, à idade j , em MPa

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

K_1, K_2 = constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimento, agregados e aditivos)

Fonte: Helene e Terzian (1992)

$$m = K_3 + K_4 * a / c \quad 3.2$$

Onde: “Lei de Lyse ”

m = relação de agregados secos/cimento em massa, em kg/kg

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

K_3, K_4 = constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimento, agregados e aditivos)

Fonte: Helene e Terzian (1992)

$$C = 1000 / (K_5 + K_6 * m) \quad 3.3$$

onde: “Lei de Molinari”

C = consumo de cimento por m³ de concreto adensado, em kg/m³

m = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg

K₅, K₆ = constantes particulares de cada conjunto de mesmos materiais

Fonte: Helene e Terzian (1992)

Depois de calculados os parâmetros das leis, constrói-se o diagrama de dosagem para as propriedades de resistência à compressão e o módulo de elasticidade, permitindo a análise comparativa dos concretos convencionais e reciclados.

Entretanto faz-se uma observação: essa metodologia aplica-se para concretos com agregados naturais com traços em massa, já para os concretos reciclados devem-se realizar misturas experimentais, do mesmo modo das misturas que são feitas para os concretos de referência, mas aplicando-se a substituição do agregado reciclado pela brita com traço em volume. E, finalmente, ao ajustar o traço, deve-se controlar a quantidade de água suficiente para garantir a trabalhabilidade da mistura, desde que não haja excesso de água, fato que comprometeria o uso racional de cimento para alcançar a resistência desejada a um custo compatível.

3.3 ASPECTOS RELATIVOS A CONCRETOS LEVES

Os concretos com agregados leves surgiram nos meados de 3000 anos (110 A.C.), no México, na cidade El Tajin, onde usaram pedra-pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal para construção de elementos estruturais. Também nessa mesma concepção, para reduzir as cargas estruturais, os romanos empregaram juntos o ligante à base de cal e rochas vulcânicas (ROSSIGNOLO, 2003).

Ao longo do tempo, existiram várias obras que foram executadas com concretos leves, como por exemplo, obras importantes no início da década de 30, a construção da pista superior da ponte na baía de São Francisco (EUA); e outras construções, como na Austrália o Square Tower, em 1967 e Standart Bank na África do Sul, em 1970 (ROSSIGNOLO, 2003).

Já no Brasil, em meados de 1970, o Grupo Rabello produziu argila expandida para fornecer agregados leves para a CINASA, com finalidade da produção de elementos pré-moldados leves.

Atualmente, pesquisadores de várias universidades estão pesquisando agregados leves na produção de concretos, como agregados de resíduos de demolição e construção (alvenarias-tijolos), resíduos de cerâmica (telhas), etc., para empregar em estruturas de concretos e/ou pavimentações, reaproveitados e recuperados, em obras para construções civis (BICCA, 2000; CACHIM et. al., 2006; DIAS, 2004; LEVY, 2001; dentre outros).

Os concretos leves são diferenciados dos concretos convencionais pela redução da massa específica e alterações das propriedades térmicas. Além dessas características, existem outras que podem ocasionar mudanças significativas nas propriedades dos concretos, como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência, além de redução da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Rossignolo (2003) refere-se aos concretos leves estruturais, os que “são obtidos com a substituição total ou parcial dos agregados tradicionais por agregados leves e, usualmente, são caracterizados pelo valor da massa específica. Considera-se concreto leve estrutural aquele que apresenta massa específica seca abaixo de 2000 kg/m^3 ”. O autor buscou dados de referência para a pesquisa em alguns documentos normativos ou relacionados a concretos leves, que se mostram a seguir. São dados referentes aos limites de massa específica dos concretos leves, que se encontram no RILEM (1975): $\gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$; no CEB-FIF (1977): $\gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$; NS 3473 E (1992) com intervalos entre $1200 \text{ kg/m}^3 < \gamma < 2200 \text{ kg/m}^3$; ACI 213 R-87 (1997) com intervalos entre $1400 \text{ kg/m}^3 < \gamma < 1850 \text{ kg/m}^3$ e CEN PREN 206-25 (1999) com intervalos entre $800 \text{ kg/m}^3 < \gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$.

Esse autor informou que a Norma da ACI 213R-87 (1997) estabelece para o concreto leve não só o valor da massa específica nos padrões estabelecidos anteriormente, mas deve também possuir a resistência à compressão acima de 17,2 MPa.

Já a Norma da ABNT NM 35/95 dita que os agregados leves, confeccionados para concretos leves, não devem possuir massa unitária no estado seco e solto, acima 1120 kg/m^3 , para os agregados miúdos e 880 kg/m^3 , para os agregados graúdos.

Assim, para estudarem-se os concretos, além de analisar o que foi referido anteriormente, têm-se a necessidade de conhecer bem as propriedades que interferem nas misturas dos concretos com agregados naturais e agregados reciclados.

3.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS COM AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

3.4.1 Massa específica

A massa específica de concretos com reciclados, em geral, é menor do que a de concretos com agregados naturais, devido à diferença da massa específica dos agregados reciclados. Na sua tese de doutorado, Lima (1999) apud I&T (1991), registrou que a massa específica dos concretos com agregados reciclados de alvenaria gira em torno de 2.000 a 2.170 kg/m³, em comparação com os concretos feitos com agregados naturais, cujo valor é de 2.250 kg/m³. Percebe-se, assim, uma redução de até 11 %, no que concerne aos valores referentes ao concreto em seu estado seco. Os autores Schulz & Hendricks (1992) apresentam dados de massas específicas dos concretos com agregados reciclados de alvenaria, variando entre 1.600 e 2.100 kg/m³.

É essencial recordar que a composição dos resíduos também influencia no valor da massa específica, ou seja, quanto mais densos os materiais que constituem os resíduos, maior será a massa específica do concreto com agregado reciclado (LEITE, 2001). Devenny e Khalaf (1999) mostraram que concretos produzidos com agregado graúdo de tijolos cerâmicos britados apresentaram valores de massa específica entre 13 a 15% menores do que aqueles referentes aos concretos feitos com agregados naturais.

Um outro ponto importante a ser observado refere-se ao fato de o concreto reciclado ser mais poroso e mais absorvente que o concreto com agregados naturais, o que provoca diferença em sua massa específica. Estudos comparativos sobre a massa específica no estado "saturado superfície seca", em comparação com o estado "seco", mostram que haverá sempre uma diferença nos valores (da massa específica) observados, nesses dois estados, que tenderá a diminuir. Nessa mesma perspectiva, Barra (1996) mostra que as diferenças entre as massas específicas do concreto no estado seco variam entre 9 % e 11 % e para o estado "saturado superfície seca" diminui para 5 % a 9 %.

Uma outra propriedade importante na confecção do concreto leve estrutural é a trabalhabilidade, que influencia nos resultados da massa específica e da resistência. Assim, a massa específica e a resistência, juntamente com a trabalhabilidade, representam duas propriedades geralmente exigidas, para concreto leve estrutural. Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 390), “com certos materiais, é geralmente desejável a maior relação entre resistência/massa específica possível, com o menor custo do concreto”. Os autores sugerem ainda que, “as especificações limitam a massa específica seca ao ar do concreto em no máximo 1840 kg/m^3 , mas não há limites para concretos leves”. Quando, na confecção do concreto, usa-se um agregado altamente poroso, com dimensão máxima maior que 19 mm, sua massa específica será inferior a 1440 kg/m^3 e o produto não atingirá uma resistência à compressão mínima de 17 MPa aos 28 dias, normalmente exigida para concreto leve estrutural. Na maior parte, os concretos leves estruturais pesam entre 1600 a 1760 kg/m^3 , embora em casos especiais, podem atingir valores acima de 1840 kg/m^3 (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

3.4.2 Trabalhabilidade e Relação a/c

Um dos conceitos centrais relativos à confecção de concretos é o de trabalhabilidade que, segundo Mehta e Monteiro (1994), não se refere a uma propriedade intrínseca do concreto, mas está diretamente ligada à aplicação do concreto. Coutinho (1997b) define trabalhabilidade como “a maior ou menor facilidade com que o concreto é transportado, colocado, adensado e acabado e a maior ou menor facilidade com que se desagrega ou segrega durante essas operações é designada pelo termo genérico de trabalhabilidade” (COUTINHO, 1997b, p. 18).

Segundo Coutinho (1997b), há várias propriedades físicas que interferem na trabalhabilidade dos concretos. São elas: o ângulo de atrito, a coesão e a viscosidade; a massa volúmica; a segregação e a exsudação. Cada uma dessas propriedades exerce uma influência diferente na trabalhabilidade dos concretos. Nas palavras de Coutinho, as propriedades físicas que influenciam na trabalhabilidade são: o ângulo de atrito, a coesão, a viscosidade – que interferem na maior ou menor mobilidade da massa; a massa volúmica – que interfere na compactação; a segregação e a exsudação – que interferem na estabilidade da mistura que constitui o concreto fresco. Por outro lado, Mehta e Monteiro (1994) mostram que essas propriedades físicas dos concretos são governadas por características

físicas e químicas dos materiais que dão origem às misturas. Dentre essas características físicas, pode-se citar a quantidade total de agregados na mistura; a proporção entre o agregado miúdo e graúdo; a distribuição granulométrica e a forma dos agregados. Já com relação às características químicas, encontram-se a reatividade do cimento e as adições que forem, por acaso, utilizadas na produção dos concretos.

No concreto com agregado reciclado, a trabalhabilidade é bastante afetada pela granulometria e pela forma e textura dos grãos. Já o consumo de água está diretamente ligado à absorção/porosidade do agregado. Por essa razão, a quantidade de água para uma dada consistência dependerá das características do agregado. Segundo Mehta e Monteiro (1994), concretos reciclados tendem a apresentar menor trabalhabilidade do que concretos feitos com agregados naturais de mesmo traço, requerendo maior quantidade de água na mistura para que se possa obter a mesma trabalhabilidade.

Mehta e Monteiro (1994, p. 348) apresentam os três métodos mais usados para uma avaliação da trabalhabilidade dos concretos. O método de abatimento do tronco de cone mede a consistência que, de acordo com seus relatos,

é usada como um simples índice da mobilidade ou da fluidez do concreto fresco. O esforço necessário para adensar o concreto é regido pelas suas características de fluxo e pela facilidade com que a eliminação dos vazios pode ser atingida sem abalar a estabilidade. A estabilidade é um índice simultâneo de capacidade de retenção de água (o oposto de exsudação) e de capacidade de retenção do agregado graúdo na massa do concreto fresco (o oposto da segregação). Uma medida qualitativa dessas características é usualmente coberta pelo termo coesão.

Os autores mostram ainda que a trabalhabilidade seja uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: a fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação.

Ao utilizar o método do abatimento do tronco de cone, indicam-se, como na Tabela 3-1, as tolerâncias admitidas para a consistência.

Tabela 3-1 – Tolerâncias admitidas para consistência do concreto através do abatimento do tronco de cone – NBR 7223

Consistência	Abatimento (mm)	Tolerâncias (mm)
Seca	0 a 20	± 5
Medianamente plástica	30 a 50	± 10
Plástica	60 a 90	± 10
Fluida	100 a 150	± 20
Líquida	≥ 160	± 30

Fonte: Helene e Terzian (1992)

Segundo Schulz e Hendricks (1992), a fabricação de concreto de alvenaria britada pode apresentar todo tipo de consistência, variando desde concretos muito rígidos até os mais plásticos. Isto dependerá se o material (tijolo e bloco de alvenaria) apresentar maior densidade e possuir uma menor porosidade, acaba acarretando uma taxa menor de absorção de água.

Já nos estudos com agregados reciclados de blocos cerâmicos para produção de concreto, Mansur et. al. (1999) avaliaram 4 traços de concreto, com substituição total do agregado gráudo natural pelo reciclado, em que as relações a/c foram 0,3; 0,4; 0,5 e 0,6. No concreto de referência, utilizou-se agregado de origem granítica. Para a produção dos concretos com agregados reciclados, estes foram saturados em água por 24 hs e secados ao ar livre para a condição saturada superfície seca. Os resultados da trabalhabilidade nas misturas feitos através do abatimento do tronco de cone apresentam-se na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Trabalhabilidade das misturas de concreto medido pelo abatimento de tronco de cone

Tipo de concreto	Abatimento (mm)			
	Relação a/c			
	0,3	0,4	0,5	0,6
Referência	116	107	91	34
Reciclado	95	82	51	22

Fonte: Mansur et. al. (1999)

Nos resultados apresentados na Tabela 3-2, observa-se que, apesar da absorção dos agregados reciclados de material cerâmico ter sido compensada, os concretos reciclados ainda apresentaram menor trabalhabilidade que os concretos de referência. Neste caso o efeito da textura rugosa e forma angulosa dos agregados reciclados é que devem ter exercido influência preponderante sobre a trabalhabilidade, uma vez que estas características têm a capacidade de provocar maior travamento, diminuindo a mobilidade entre as partículas das misturas de concreto.

3.4.3 Resistência à compressão axial

A resistência é considerada, geralmente, a propriedade fundamental do concreto, pois esta dá a indicação geral da qualidade do concreto por estar diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida. Para os casos gerais, à medida que aumentam as resistências mecânicas melhoram-se as demais propriedades, daí a importância de se controlar a resistência à compressão, pois estarão sendo avaliadas, indiretamente, as demais propriedades do concreto endurecido (NEVILLE, 1997).

Segundo Helene e Terzian (1992), a resistência à compressão é a propriedade do concreto que é geralmente adotada por ocasião do dimensionamento da estrutura. Portanto, está diretamente ligado à segurança estrutural, devendo a obra ser construída em concreto com resistência superior ou igual à adotada para a elaboração do projeto. Sem dúvida, a propriedade do concreto que melhor o qualifica é a resistência à compressão. Desde que em sua dosagem e proporção tenham sido considerados também os aspectos de durabilidade, optando-se por determinada curva granulométrica, tipo e classe de cimento e relação a/c, resultando conseqüentemente em determinada resistência.

Atualmente, convencionou-se medir a resistência à compressão aos 28 dias, por meio de um ensaio padrão (compressão axial), hoje aceito como um parâmetro universal e como índice de referência de concreto. A determinação da resistência à compressão efetua-se sobre corpos de prova normalizados pela ABNT, no entanto, os valores de ensaio são mais ou menos dispersos, podendo variar de uma obra para outra. Por esta razão, faz-se necessário garantir o cuidado e o rigor devidos para a produção de concreto.

A resistência do concreto cresce sempre com o tempo, ou seja, com a idade, observa-se um aumento de sua hidratação e, conseqüentemente, de sua resistência. A Equação de Abrams, proposta em 1918, após estudo em mais de 50.000 resultados de corpos de provas, mostrou que, quanto menor a relação água/cimento, maior a resistência do concreto, até o limite de 0,30 mais ou menos que corresponde à quantidade mínima de água para a hidratação do cimento.

Consultando dados de experimentos relatados por Mehta e Monteiro (1994), Levy (2001), dentre outros, observa-se que a resistência do concreto cresce com o aumento do módulo de finura do agregado, com aumento da resistência do agregado, e com o aumento da superfície de contato agregado/pasta (para uma mesma granulometria). É importante que se diga, contudo, que a operação de ensaios propriamente dita pode alterar os resultados, o que explica a necessidade de se normalizarem os métodos de ensaio (moldagem, cura, capeamento, velocidade de aplicação da carga, etc.).

No que se refere à resistência à compressão, Hansen (1992) afirma que, na aplicação dos concretos reciclados, esta varia entre 60% e 100% em relação ao concreto com agregados naturais. Segundo o autor, em várias pesquisas, foram encontrados valores de resistência à compressão de concretos com agregados graúdos reciclados, variando entre 5 a 20% mais baixos que os valores de resistência dos concretos de referência. O autor mostra ainda que, no Japão, a taxa de redução das resistências de concretos reciclados oscila entre 14 e 32%.

Por outro lado, algumas pesquisas revelam que quando se muda o teor de substituição de agregados naturais por reciclados, há um desempenho mecânico negativo no concreto. Os pesquisadores mostram que quando se substituem agregados naturais por reciclados, na proporção igual a 30%, a resistência não é afetada negativamente. Já para o teor de substituição inferior a 30%, a resistência pode igualar-se à dos concretos com referência (CARRIJO, 2005; LIMBACHIYA et. al.,1998b).

Estudo realizado por Devenny e Khalaf (1999), a partir da utilização de 4 tipos de tijolos cerâmicos para a produção de concreto, mostrou que a resistência à compressão variava para cada tipo de mistura. Dois tipos de mistura foram realizados: a primeira apresentando uma relação água/cimento de 0,55 e a segunda uma relação água/cimento de 0,40. De acordo com os resultados por eles apresentados, a resistência à compressão cresce à

medida que cresce a resistência à compressão do tipo de tijolo usado em qualquer uma das duas misturas. Assim, os autores concluíram que é possível confeccionar concretos com resistência de até 67 MPa, para tijolos cerâmicos britados com o agregado graúdo, usando-se uma relação a/c de 0,40. O tipo de ruptura encontrada levou os autores a concluir que há uma boa aderência entre a pasta do concreto e o agregado, uma vez que a ruptura também ocorre no agregado, ao invés de ocorrer na interface pasta/agregado, como se observa mais comumente em concretos feitos com agregado natural. Esses resultados devem-se ao fato de que a maior angulosidade apresentada pelo material reciclado faz com que o mesmo possua maior área de superfície de contato do que o agregado natural, o que proporciona a aderência da pasta com o agregado.

Já o estudo relatado por Mansur et. al. (1999) mostrou que os concretos feitos com agregado graúdo reciclado de blocos cerâmicos apresentaram resistência à compressão de aproximadamente 10 % maior que as respectivas misturas de referência, na variação da relação a/c entre 0,3 a 0,6. No que se refere ao traço com relação a/c igual a 0,3, o concreto reciclado apresentou resistência de 72 MPa, contra 64 MPa do mesmo traço de referência com brita granítica. Para explicar o melhor comportamento do concreto reciclado, os autores citam os seguintes fatores: superfície rugosa, alta angulosidade, alta densidade e alta resistência dos agregados de blocos cerâmicos (153 MPa). Esses agregados de tijolos apresentaram massa específica aparente de 2.330 kg/m³ e absorção de água de 6,1%. Além disso, os autores mostram que a textura e forma dos agregados reciclados podem proporcionar uma melhor aderência entre a pasta e o agregado levando ao aumento da resistência.

Ainda com relação à resistência dos concretos, Barra (1996) observou que, à medida que a a/c diminui, há um aumento de resistência para os concretos reciclados, cuja resistência é menor do que a dos concretos convencionais. Seu estudo foi desenvolvido a partir de misturas de concretos com agregados graúdos reciclados de concreto e agregados graúdos reciclados de material cerâmico, em comparação com agregados convencionais.

3.4.4 Resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão

A resistência à tração dos concretos geralmente se apresenta como uma característica mecânica secundária, visto que é sabido que o concreto não se apresenta como bom

material para resistir aos esforços de tração das estruturas. Porém, quando se faz um estudo criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando são utilizados novos materiais, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada. Assim, torna-se importante saber quais são as variações da resistência à tração por compressão diametral e na flexão.

O comportamento do concreto sob tração é discutido por Mehta e Monteiro (1994, p. 72):

A relação entre as resistências à compressão e a razão resistência à tração/compressão parece ser determinada pelo efeito de vários fatores nas propriedades da matriz e da zona de transição no concreto. Observa-se que não apenas o tempo de cura, mas também as características da mistura do concreto, tais como o fator água/cimento, tipo de agregado e aditivos afetam a razão resistência à tração/compressão em vários níveis.

Mehta e Monteiro (1994) definem a razão entre as resistências à tração por compressão diametral e a compressão em torno de 10 a 11% para concreto de baixa resistência, 8 a 9% para concreto de média resistência e 7% para concreto de alta resistência.

Ainda segundo esses autores, há outros fatores que podem, igualmente, influenciar na resistência dos concretos, tais como: métodos pelos quais a resistência à tração é medida; a qualidade do concreto; as características dos agregados e os aditivos usados no concreto.

De acordo com estudo relatado por Akhtaruzzaman e Hasnat (1983), concretos produzidos com agregados reciclados apresentam resistência à compressão de, aproximadamente, 37MPa. Em seu experimento, os autores observaram que a resistência à tração naquele tipo de concreto foi 11% superior à do concreto convencional. Já os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de blocos cerâmicos, quando comparados aos concretos convencionais, segundo a pesquisa de Mansur et al. (1999), apresentaram um aumento de resistência de 9 a 12% para a resistência à tração na flexão e por compressão diametral, em relação ao concreto de referência, para uma variação da a/c de 0,3 a 0,6. Esses resultados são relacionados à forma angular e à textura rugosa dos agregados reciclados, que proporcionam melhor aderência pasta/agregado.

3.4.5 Módulo de deformação

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a importância do limite de elasticidade em um projeto estrutural é devido ao fato de ele representar a deformação máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente. Portanto, o engenheiro deve conhecer o módulo de elasticidade do material uma vez que este influi no cálculo estrutural; conhecido o módulo, será possível calcular as flechas máximas admissíveis, ou seja, as flechas que não provocarão fissuras além de determinados limites.

O concreto apresenta deformações elásticas bem como inelásticas, quando sob carga e deformações de retração na secagem ou resfriamento. Quando restringidas, as deformações de contração resultam em complexos padrões de tensões que freqüentemente levam à fissuração. A relação entre a tensão e a deformação do concreto é função do tempo. O aumento progressivo da deformação, com o tempo, sob a ação da carga, é devido à fluência. A fluência pode, portanto, ser definida com o aumento de deformação sob uma tensão constante, e como esta deformação pode ser várias vezes maior do que a deformação na aplicação da carga. A fluência tem um papel considerável na mecânica das estruturas (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

As deformações do concreto podem se dividir em duas classes: deformações próprias ou intrínsecas, ou deformações produzidas por cargas externas. As deformações próprias podem ser: retração e deformação térmica. A retração é o fenômeno de variação espontânea de volume que ocorre no concreto e em outros materiais cuja estrutura interna seja de natureza porosa, na ausência de tensões mecânicas e de variações de temperatura. A retração subdivide-se em: retração devida à contração química, retração por secagem ou expansão por umedecimento e retração por carbonatação. A deformação térmica é a decorrente da variação de temperatura que tanto pode ser externa como gerada pela própria reação exotérmica de hidratação. As deformações produzidas por cargas externas classificam-se em deformação imediata ou instantânea e deformação lenta. A deformação imediata ou instantânea é a que se observa no ato de aplicação das cargas, mantidas as condições termo-higrométricas constantes. A deformação lenta é observada no decorrer do tempo em concretos submetidos a cargas permanentes e desde que constantes as condições termo-higrométricas (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), existe uma relação direta entre a resistência e módulo de deformação do concreto, no qual ambos são afetados pela porosidade do concreto. Definem, também, que as características do agregado graúdo influenciam de certo modo no módulo de deformação do concreto, principalmente a sua porosidade, dentre outras propriedades como: a dimensão máxima, a forma, a textura superficial, a granulometria e a sua composição mineralógica. Os autores relatam ainda que o módulo de deformação de um agregado leve gira em torno de 14 a 21 GPa, o que representa de 50% a 75% do módulo do concreto de peso normal com a mesma resistência.

Já na opinião de Neville (1997), a relação entre o módulo de deformação e a resistência depende também das proporções da mistura, pois o agregado, em geral, tem um módulo maior do que a pasta e da idade do concreto; em idades maiores, o módulo aumenta mais rapidamente do que a resistência. Assim, para o módulo dos concretos preparados com agregado leve, há normalmente, valores entre 40% a 80% do módulo de um concreto comum da mesma resistência. Todavia, o módulo dos agregados leves difere pouco do módulo da pasta de cimento, assim as proporções da mistura não têm influência sobre o dos concretos preparados com esses agregados.

Hansen (1992) menciona que concretos reciclados, apresentam, geralmente, uma redução entre 15% a 40% do módulo de elasticidade em relação aos concretos com agregados naturais. E mostra que a diferença entre o módulo de elasticidade dos concretos reciclados e convencionais aumenta à medida que crescem os valores da resistência à compressão.

Comumente, os concretos reciclados apresentam-se mais deformáveis que os concretos convencionais. No parecer de Levy (1997), esse fato é devido à camada de argamassa antiga aderida à superfície do agregado reciclado de concreto e a maior porosidade dos materiais que compõem o resíduo.

Para estimar o valor do módulo de Elasticidade, pode-se basear nos modelos indicados nas equações 3.4 e 3.5, segundo os diferentes códigos e normas. A equação 3.4 representa o modelo da CEB (1990) – Comitê Euro-Internacional du Betón (expressão para corpos-de-prova cilíndricos) e a equação 3.5 representam o modelo da ACI 318 (1992).

$$E_c = 10 * \sqrt[3]{f_{cm}} \quad 3.4$$

onde:

E_c = módulo de elasticidade do concreto (GPa)

f_{cm} = resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)

Fonte: CEB (1990) – Comitê Euro-Internacional du Betón

$$E_c = 0,043 * \gamma^{1,5} * f_c^{0,5} \quad 3.5$$

onde:

E_c = módulo de elasticidade do concreto (MPa)

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa)

γ = massa específica aparente do concreto (kg/m^3)

Fonte: ACI 318 (1992)

Obs: restrição do concreto com $f_c < 41$ MPa

3.4.6 Aditivo

Para execução de algumas misturas de concreto com agregado reciclado de telha foi utilizado o aditivo superplastificante, com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade das misturas sem aumentar as relações água/cimento tidas como referência.

Para um dado fator água/cimento a presença de aditivos redutores de água no concreto geralmente tem influência positiva sobre a taxa de hidratação do cimento e o desenvolvimento da resistência a baixas idades (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os aditivos superplastificantes conferem ao concreto aumento de trabalhabilidade sem alterar a composição da mistura. Permite redução da relação água/cimento ou relação água/material cimentante, possibilitando diminuição da retração térmica causada pela hidratação do cimento, incremento na resistência e melhoria da durabilidade. Dependendo do conteúdo de sólidos na mistura do aditivo, dosagens entre 1 e 2 % sobre a massa de cimento são aconselháveis (CREMONINI et. al, 2001).

Dentre os diversos tipos de aditivos superplastificantes (à base de condensados de formaldeído melamina sulfonados, de formaldeído naftaleno sulfonados, lignosulfonados modificados, e polímeros acrílicos) os aditivos à base de polímeros acrílicos são os que apresentam maiores vantagens, tais como: menores relações água/aglomerante para uma mesma trabalhabilidade; considerável redução na perda do abatimento com o tempo; e sua eficiência não depende do momento de adição (junto à água de amassamento ou após a mistura do concreto) (CREMONINI et. al, 2001).

3.4.7 Materiais pozolânicos

Os aditivos minerais são materiais silicosos finamente moídos, adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, geralmente na faixa de 20 a 100% da massa do cimento Portland (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Em suas pesquisas, Cremonini et. al. (2001) mostram que Mehta e Aitcin (1990) chegam a afirmar, que “a incorporação de adições minerais ao concreto propicia tantas vantagens técnicas que nenhuma mistura deveria ser feita sem materiais pozolânicos”.

O concreto no estado fresco, com presença de finas partículas de materiais pozolânicos resulta em consideráveis melhorias nas propriedades reológicas, tais como: coesão estabilidade, otimizando-se a zona de transição, através da minimização da perda de água e da segregação, além de reduzir o calor de hidratação e a perda de abatimento com o tempo. Os autores exemplificam que a sílica ativa atua através do efeito filer e das reações pozolânicas, aumentando a densidade da matriz e a resistência do concreto desde as primeiras idades (CREMONINI et. al., 2001).

Mehta e Monteiro (1994, p.57) afirmam que as adições minerais estão aumentando gradualmente devido,

A capacidade do aditivo mineral em reagir sob temperaturas normais com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento Portland hidratada e formar mais silicato de cálcio hidratado pode levar a uma redução significativa da porosidade da matriz e da zona de transição. Consequentemente, uma melhora considerável na resistência final e na estanqueidade pode ser alcançada com a incorporação de aditivos minerais no concreto. Deve-se notar que as adições

minerais são particularmente eficazes para aumentar a resistência à tração do concreto.

Empregando os aditivos minerais há uma melhora na resistência à fissuração térmica devido ao calor de hidratação mais baixo, também há um aumento das resistências e da impermeabilidade do refinamento dos poros (reduz a alcalinidade), e uma durabilidade maior a ataques químicos, como as águas sulfatadas e a expansão álcali-agregado (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Na seqüência deste trabalho, aborda-se, no próximo capítulo os aspectos metodológicos definidos para a execução do programa experimental.

CAPÍTULO 4

ASPECTOS METODOLÓGICOS

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com finalidade de dar embasamento técnico e científico a esta dissertação de mestrado, planejou-se um projeto experimental para avaliar o comportamento do agregado reciclado na produção de concretos.

Aplicou-se na dosagem dos concretos com agregados naturais a metodologia do IPT-EP/USP (HELENE e TERZIAN, 1992).

Estudaram-se as propriedades desses concretos no estado fresco e no estado endurecido, com a substituição do agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado de telha.

4.1.1 Variáveis estudadas

O objetivo da investigação consiste em avaliar a influência do agregado reciclado gráudo de telha (ART), em substituição aos agregados gráudos naturais (Agn). Para isso foram definidas as seguintes variáveis a serem estudadas:

- Massa específica do concreto no estado fresco
- Resistência à compressão axial (f_c)
- Resistência à compressão diametral ($f_{ct,sp}$)
- Resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$)
- Módulo de elasticidade (E_c)

- Absorção de água por Imersão (A_{bsi})
- Índice de vazios (I_v)
- Consumo de cimento (C)

4.1.2 Variáveis fixas

As variáveis fixas ou independentes são fatores que devem ser mantidos constantes, ou seja, que serão mantidas fixas até o final do experimento. Adotou-se no presente estudo o seguinte:

- Cimento – CII E 32 (Ciminas/Cauê), o mais comumente usado na região de Uberlândia.
- Traços e consistência – Traços 1: 3,5 ; 1: 5 ; 1: 6,5, e o abatimento do tronco de cone 80 ± 20 mm.
- Teor de argamassa – Modelo de comportamento adotado pelo método ITERS-IPT-EPUSP. Determinou-se teor da argamassa experimentalmente no traço 1:5, variando o teor de argamassa da mistura, para uma melhor proporção entre os materiais, através de tentativas e observações práticas.

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + a + p}$$

4.1

Onde:

α = Teor de argamassa, deve ser constante para uma determinada família, em kg/kg

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg

p = relação agregado graúdo seco/cimento em massa, em kg/kg

Fonte: Helene e Terzian (1992)

- Relação água / materiais secos

4.2

$$H = \frac{a/c}{1+m}$$

Onde:

H = relação água/materiais secos deve ser constante para uma determinada família para assegurar o mesmo abatimento, em kg/kg

a/c = relação água/cimento em massa, em kg/kg

m = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg

Fonte: Helene e Terzian (1992)

- Idade dos ensaios.

Estabeleceram-se, para as propriedades avaliadas, as idades dos ensaios de 7 e 28 dias para todos os concretos.

- Cura

Os corpos-de-prova dos concretos de referência foram curados por imersão em água saturada com cal até a data dos ensaios. Os corpos-de-prova dos concretos com agregados reciclados (ART) ficaram 14 dias no tanque de imersão com água saturada com cal e posteriormente expostos ao ambiente do laboratório, variando a temperatura entre 23 a 25 °C (estabelecido conforme a norma NBR 5738).

- Agregados utilizados na preparação dos concretos e sua composição

Foram utilizados: agregado miúdo natural – Amn (areia grossa), agregado graúdo natural - Agn (brita 1) e agregado reciclado graúdo de telha (ART).

Tabela 4-1-Agregados utilizados

Concreto	Composição do agregado utilizado
1ª Família Referência	Agregados miúdos e graúdos naturais
2ª Família ART 100%	Agregado graúdo: 100% ART Agregado miúdo natural
3ª Família ART / Brita 1 50%	Agregado graúdo: 50% Brita 1 e 50% ART Agregado miúdo natural

Na Tabela 4-2, apresenta-se uma programação esquemática envolvendo todos os parâmetros de execução dos experimentos, bem como o número de corpos-de-prova que foram moldados para cada traço.

Significado das siglas adotadas:

T_R C-B-1: Concreto com agregado gráúdo natural (B-1) - Traço Rico em cimento.

T_N C-B-1: Concreto com agregado gráúdo natural (B-1) - Traço Normal em cimento.

T_P C-B-1: Concreto com agregado gráúdo natural (B-1) – Traço Pobre em cimento.

T_R C-ART100: Concreto com agregado gráúdo reciclado com substituição total da B-1 por ART - Traço Rico em cimento.

T_N C-ART100: Concreto com agregado gráúdo reciclado com substituição total da B-1 por ART - Traço Normal em cimento.

T_P C-ART100: Concreto com agregado gráúdo reciclado com substituição total da B-1 por ART - Traço Pobre em cimento.

T_R C-ART50: Concreto com agregado gráúdo reciclado com substituição parcial da B-1 por 50% do ART - Traço Rico em cimento.

T_N C-ART50: Concreto com agregado gráúdo reciclado com substituição parcial da B-1 por 50% do ART - Traço Normal em cimento.

T_P C-ART50: Concreto com agregado gráúdo reciclado com substituição parcial da B-1 por 50% do ART - Traço Pobre em cimento.

Tabela 4-2 – Esquema de variáveis ensaiadas no programa experimental e n°. CP's

Concretos	%Amn	%Agn	%ART	Nº de traço	Ensaio	Idade (dias)	Nº CP's
T _R C-B-1	100	100	-	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	12
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5
T _N C-B-1	100	100	-	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	12
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5
T _P C-B-1	100	100	-	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	12
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5
T _R C-ART100	100	-	100	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	12
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5
T _N C-ART100	100	-	100	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	24
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5
T _P C-ART100	100	-	100	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	12
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5
T _R C-ART50	100	50	50	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	12
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5
T _N C-ART50	100	50	50	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	12
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5
T _P C-ART50	100	50	50	1	f _c , f _{ct,sp} , E _c	7,28	12
					f _{ct,f} , I _v , A _{bsi}	28	5

165

Para os traços adicionais estudados, mostra-se também a programação esquemática de todos os corpos-de-prova com seus devidos traços.

T_B C-B-1: Concreto com agregado graúdo natural na seqüência invertida - Traço Normal em cimento.

T_C C-ART100: Concreto com agregado graúdo reciclado com substituição total da B-1 por ART na seqüência invertida, introduzindo aditivo depois de feita a argamassa - Traço Normal em cimento.

T_D C-ART100: Concreto com agregado graúdo reciclado com substituição total da B-1 por ART na seqüência invertida, introduzindo o aditivo na argamassa – Traço Normal em cimento.

T_E C-ART00: Concreto com agregado graúdo reciclado com substituição total da B-1 por ART na seqüência invertida, umidificando o ART em 24 horas com 80% da absorção_{sss} do ART – Traço Normal em cimento.

T_F C-ART100: Concreto com agregado graúdo reciclado com substituição integral da B-1 por ART e também com substituição de 8% da massa de cimento pelos finos do ART, adotando a seqüência normal para a produção do concreto; este traço foi produzido na dosagem denominada Traço Normal, ou seja, com o consumo Normal de cimento.

T_G C-ART100: Concreto com agregado graúdo reciclado c/ substituição total da B-1 por ART, com adição de cimento e água para retornar a relação a/c inicial, adotando a seqüência normal – Traço Normal em cimento.

Tabela 4-3 – Esquema de variáveis ensaiadas no programa experimental e n°. CP's

Concretos	%Amn	%Agn	%ART	Nº de traço	Ensaio	Idade (dias)	Nº CP's
T _B C-B-1	100	100	-	1	f _c	7,28	4
					I _v , A _{bsi}	28	2
T _C C-ART100	100	-	100	1	f _c	7,28	4
					I _v , A _{bsi}	28	2
T _D C-ART100	100	-	100	1	f _c	7,28	4
					I _v , A _{bsi}	28	2
T _E C-ART00	100	-	100	1	f _c	7,28	4
					I _v , A _{bsi}	28	2
T _F C-ART100	100	-	100	1	f _c	7,28	4
					I _v , A _{bsi}	28	2
T _G C-ART100	100	-	100	1	f _c	7,28	4
					I _v , A _{bsi}	28	2

4.1.3 Variáveis que foram alteradas

Variáveis que foram alteradas e que talvez tenham algum efeito sobre as variáveis estudadas.

- Relação água/cimento (a/c):

Para atender a metodologia adotada, obtêm-se assim, a melhor proporção entre os agregados disponíveis, que corresponde a que consome a menor quantidade de água, para obter o abatimento desejado de 80 ± 20 mm e faz-se isso considerando a interferência do aglomerante (cimento + adições) na proporção total de materiais. A relação dos materiais varia conforme se obtém os traços seco, plástico e fluido.

- Consumo de cimento/m³:

Determinação empírica calculada pelas expressões indicadas nas equações 4.3 e 4.4, a seguir:

$$C = \frac{(1000 - ar)}{1/\gamma_c + 1/\gamma_a + 1/\gamma_p + a/c} \quad 4.3$$

Onde:

C = consumo de cimento/m³ de concreto adensado, em kg/m³

γ_c = massa específica do cimento, em kg/dm³

γ_a = massa específica do agregado miúdo, em kg/dm³

γ_p = massa específica do agregado graúdo, em kg/dm³

a/c = relação água/cimento em massa, em kg/kg

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm³/m³

Fonte: Helene e Terzian (1992)

$$C = \frac{\gamma}{1 + m + a/c} \quad 4.4$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³

γ = massa específica do concreto fresco, em kg/m³

m = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg

a/c = relação água/cimento em massa, kg/kg

Fonte: Helene e Terzian (1992)

- Teor de umidade dos agregados

Os agregados graúdos de telha foram utilizados secos ao ar. Adotou-se esta condição pela praticidade de execução e porque nos experimentos realizados por Poon et. al. (2004), os autores concluíram nesse trabalho os concretos estudados apresentaram maior resistência à compressão do que outros preparados com agregados secos em estufa e saturados com a superfície seca.

4.2 CONCRETO - PROPRIEDADES AVALIADAS

Na Tabela 4-4 relaciona-se às normas de ensaios utilizadas.

Tabela 4-4 – Propriedades avaliadas e os métodos de ensaios

Massa específica no estado fresco	NBR 9833 (1987) NBR NM 33 (1998)	Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método. Concreto – Amostragem de concreto fresco.
Trabalhabilidade	NBR-NM 67(1998)	Concreto – Determinação de consistência pelo abatimento de tronco de cone.
Resistência à compressão	NBR 5739 (1994)	Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio.
Resistência à tração por flexão	NBR 12142 (1994)/MB-3483 (1991)	Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos – Método de ensaio.
Resistência à compressão diametral	NBR 7222 (1994)	Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio.
Módulo de elasticidade	NBR 8522 (2003)	Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva de tensão-deformação – Método de ensaio.
Absorção de água por Imersão	NBR 9778 (1987)	Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica.

4.2.1 Massa específica

A massa específica do concreto no estado fresco foi determinada tanto para o concreto de referência quanto para o concreto com agregado reciclado, obedecendo à prescrição da norma para este ensaio.

4.2.2 Trabalhabilidade

Dentro do programa experimental, foi realizado o estudo da trabalhabilidade dos concretos de referência e reciclados, em que se avaliou esta propriedade pela norma de determinação de consistência pelo abatimento do tronco de cone para todos os traços apresentados na matriz dos experimentos.

4.2.3 Resistência à compressão axial

Para cada idade, foram ensaiados 2 exemplares por traço de concreto. Para os concretos de referência, utilizaram-se 6 corpos-de-prova cilíndricos (15×30), sendo que 4 corpos-de-prova foram curados no tanque com solução de cal (até as idades de 7 e 28 dias) e 2 curados na câmara úmida (até os 28 dias). Para os concretos com agregado reciclado, executaram-se 4 corpos-de-prova cilíndricos (15×30), que foram rompidos nas idades de 7 e 28 dias, sendo a cura realizada 14 dias no tanque e os outros 14 dias expostos no ambiente do laboratório.

4.2.4 Resistência à tração na flexão

O ensaio foi feito com 2 exemplares para cada traço de concreto e a ruptura foi executada aos 28 dias.

4.2.5 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado em dois exemplares de corpos-de-prova cilíndricos (15×30) para cada traço, com ruptura nas idades de 7 e 28 dias.

4.2.6 Módulo de deformação

O ensaio foi realizado em dois exemplares de corpos-de-prova cilíndricos (15×30) para cada traço, nas idades de 7 e 28 dias.

4.2.7 Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica seca

Após ter completado os 28 dias de idade, foram colocados em estufa 3 exemplares de corpos-de-prova cilíndricos (15×30) de cada traço dos concretos, à temperatura de 105 ± 5 °C e mantidos até 72 horas na estufa. Depois de resfriados foram pesados secos ao ar e finalmente imersos para posterior pesagem em balança hidrostática.

4.3 METODOLOGIA ADOTADA NA REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO-DOSAGEM EXPERIMENTAL

Para produção dos concretos, como já se mencionou, foi adotada a metodologia do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Este método necessita de pelo menos três pontos que são usados para montar o diagrama de dosagem que correlaciona resistência à compressão, relação água/cimento, traço unitário em massa e consumo de cimento. O estudo consiste no ajuste do teor ideal de argamassa para um traço intermediário, fixando-se um valor de abatimento. Em seguida, são executados mais dois traços, um mais pobre e outro mais rico em cimento, com os quais são moldados corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão e com os resultados é elaborado o diagrama de dosagem.

4.3.1 Ajuste do teor de argamassa

O ajuste de teor de argamassa a ser empregado nas misturas foi determinado por tentativas e observações práticas, visando obter um adequado preenchimento dos vazios com coesão da mistura, buscando que este teor fosse o menor possível, para não elevar o consumo de cimento, segundo Helene e Terzian (1992).

Encontrou-se, por tentativas, o teor ideal de argamassa, variando os teores de argamassa das misturas de 0,48 a 0,55, para o traço estabelecido 1:5 do concreto de referência, em

massa. A trabalhabilidade medida através do ensaio de abatimento de tronco de cone (NBR NM 67 (ABNT, 1998)) foi fixada em 80 ± 20 mm.

Na Figura 4.1 apresenta-se os resultados relacionados à relação a/c e os teores de argamassa. No Anexo A, apresenta-se a tabela com todos os resultados obtidos no ajuste do teor de argamassa. O ponto referente ao teor de argamassa abaixo de 0,48, ou seja 0,45, não foi incluído no gráfico da Figura 4.1 devido não ter atingido o Slump requerido.

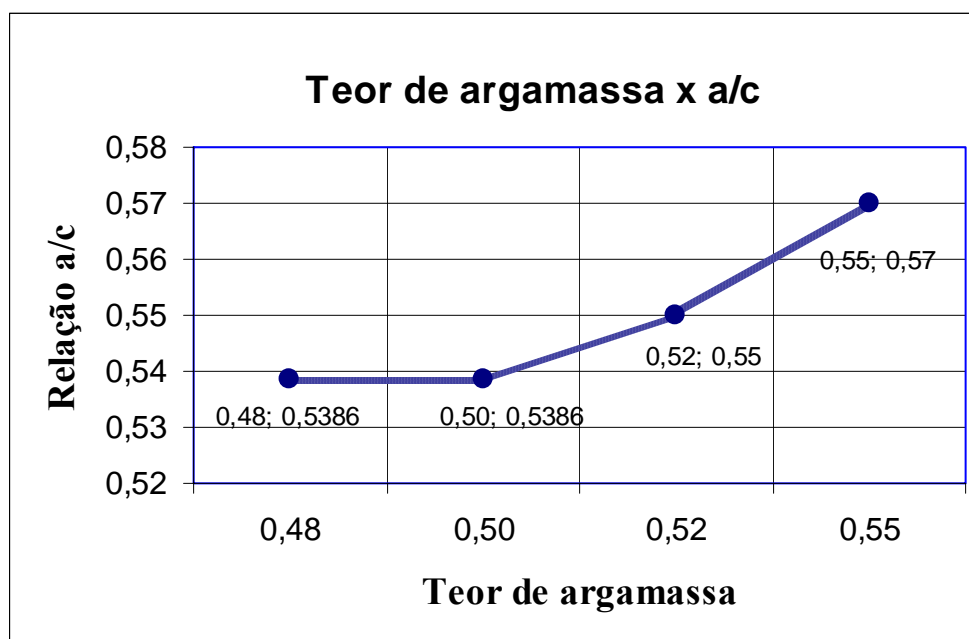


Figura 4.1 – Teor de argamassa e relação a/c

Analisando-se os resultados obtidos, adotou-se o teor de argamassa de 50% e a relação a/c de 0,54 para o traço 1: 5, ou seja, determinou-se, de acordo com o método, um ponto de mínimo.

4.3.2 Traços auxiliares

Nesta etapa, definiram-se os dois traços auxiliares, para possibilitar a montagem do diagrama de dosagem. Experimentalmente, de posse do teor de argamassa seca, pode-se determinar empiricamente e encontrar a relação água/materiais secos e o consumo de cimento/m³, pelas equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. Obtiveram-se, assim, as proporções dos

materiais a e p, e com elas foram definidos os traços auxiliares seguintes: para o traço rico 1:1,25:2,25:0,4; para o traço normal 1:2:3:0,54 e para o traço pobre 1:2,75:3,75:0,67.

4.3.3 Produção dos concretos

Depois de calculados os traços auxiliares, realizam-se as misturas experimentais, nas quais foram ajustadas para cada traço a relação água/cimento para obter o abatimento de 80 ± 20 mm estabelecido para o experimento.

Para o concreto de referência, foi estabelecida a seguinte ordem para mistura: primeiramente imprimou-se a betoneira, em seguida introduziu-se o agregado graúdo natural (100%), 80% da água de amassamento e, na seqüência, o cimento (100%), o agregado miúdo (100%), e 20% da água de amassamento; finalmente ajustou-se com água para atingir o abatimento requerido. Após o tempo de mistura estipulado em 5 minutos, realizou-se o ensaio do abatimento de tronco de cone.

Depois de decorrido o tempo máximo de 20 minutos para a mistura, moldaram-se os corpos-de-prova e, simultaneamente, foi executado o ensaio para determinar a massa específica do concreto no estado fresco.

No dia seguinte, colocaram-se os corpos-de-prova para serem curados no tanque em imersão em água saturada com cal, aguardando as idades estipuladas para os ensaios de ruptura. Com os resultados obtidos dos rompimentos dos corpos-de-prova, montou-se o diagrama de dosagem baseado na teoria de Helene e Terzian (1992). Fez-se o mesmo para a propriedade do módulo de elasticidade. Visualiza-se no gráfico da Figura 4.2, o diagrama de dosagem do concreto de referência para os traços rico, normal e pobre, relacionado à resistência à compressão, nas idades de 7 e 28 dias.

No diagrama de dosagem, como modelo de comportamento, são feitas as correções pelas equações dos três quadrantes, calculadas pela teoria dos mínimos quadrados, de acordo com as equações 3.1 (p. 44) a “Lei de Abrams”, 3.2 (p. 44) a “Lei de Lyse” e 3.3 (p. 45) a “Lei de Molinari”.

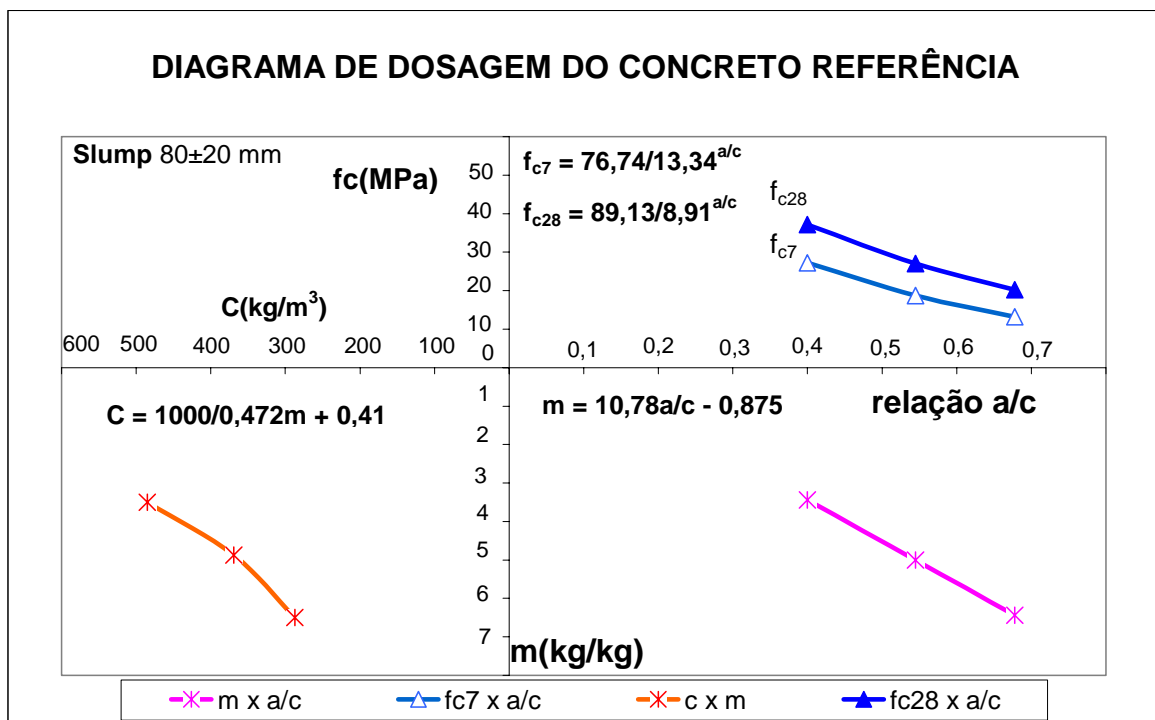


Figura 4.2 – Diagrama de dosagem do concreto de referência

4.3.3.1 Definição dos traços com ART

Terminada a execução dos concretos de referência (com agregado natural a B-1), foram produzidos os concretos com agregados reciclados com substituição total (100%) e parcial (50%) da B-1 por ART.

Os traços teóricos dos concretos com ART foram definidos por substituição volumétrica da B-1 pelo ART. A relação dos traços iniciais (são os traços teóricos definidos, ou seja, antes de possíveis correções na betoneira) é apresentada na Tabela 4-5.

Para a produção dos concretos com ART, adotou-se a mesma seqüência utilizada na produção dos concretos com B-1.

Ao se preparar os concretos com ART, verificou-se a dificuldade de manter a mesma seqüência para a mistura. Isso se devia à maior absorção do ART, que “secava” a mistura, provocando a formação de “pelotas” de cimento e a aderência da argamassa nas paredes da betoneira.

Tabela 4-5 – Traços iniciais dos concretos e quantidade de materiais

Concreto C-B-1						
	Cimento	Areia	B-1	Água	a/c	
Traço Rico	1	1,25	2,25			0,4
Qtidade - T _R	70	87,5	157,5	28,0		
Traço Normal	1	2	3			0,54
Qtidade - T _N	60,0	120	180	32,40		
Traço Pobre	1	2,75	3,75			0,67
Qtidade - T _P	50	137,5	187,5	33,50		
Concreto C-ART100 – Os traços dos concretos foram executados em 2 rodadas						
	Cimento	Areia	ART	Água	a/c	
Traço Rico	1	1,25	1,45			0,4
Qtidade - T _R	35	43,75	50,75	14,0		
Traço Normal	1	1,95	1,88			0,545
Qtidade - T _N	30	58,5	56,4	16,35		
Traço Pobre	1	2,75	2,42			0,678
Qtidade - T _P	25	68,75	60,5	16,95		
Concreto C-ART50 - Os traços dos concretos foram executados em 2 rodadas						
	Cimento	Areia	B-1	ART	Água	a/c
Traço Rico	1	1,25	1,13	0,73		0,40
Qtidade - T _R	35	43,75	39,55	25,55	14,0	
Traço Normal	1	1,95	1,46	0,94		0,545
Qtidade - T _N	30	58,5	43,8	28,20	16,35	
Traço Pobre	1	1,25	1,88	1,21		0,678
Qtidade - T _P	25	68,75	47,0	30,25	16,95	

Para solucionar o problema, adotou-se uma nova seqüência de mistura para os concretos com ART, ficando assim: primeiramente imprimou-se a betoneira, logo a seguir colocou-se as quantidades estipuladas pelo traço, o ART (100%) e juntamente 80% de água da absorção do ART, em seguida introduziu-se o cimento (100%) e 80% da água de amassamento, seguindo adicionou-se o agregado miúdo (100%) e 20% da água de amassamento, finalmente o ajuste da água para atingir o Slump. Obedecendo a esta ordem, com o tempo de 5 minutos, realizou-se o ensaio do abatimento de tronco de cone até encontrar a consistência desejada 80 ± 20 mm. Os corpos de prova moldados foram curados até as idades estabelecidas.

Na Tabela 4-6, apresentam-se os resultados dos traços ajustados dos concretos, mostrando a variação no consumo final de água total, a relação $a/c_{\text{provável}}$ para cada traço e o *slump* final obtido.

Tabela 4-6–Traços finais, quantidade de materiais e abatimento de tronco de cone

Concreto C-B-1						
	Cimento	Areia	B-1	a/c; Água	Slump(mm)	
Traço Rico	1	1,25	2,25	0,4	90	
Qtidade - T _R	70	87,5	157,50	28,0		
Traço Normal	1	1,95	2,92	0,545	85	
Qtidade - T _N	61,60	120,0	180,0	33,60		
Traço Pobre	1	2,75	3,75	0,678	78	
Qtidade - T _P	50	137,5	187,5	33,90		
Concreto C-ART100 – Os traços dos concretos foram executados em 2 rodadas						
	Cimento	Areia	ART	a/c p.; Água	Slump(mm)	
Traço Rico	1	1,25	1,45			
Qtidade - T _R	35	43,75	50,75	0,41;21,50	75	
Qtidade - T _R	35	43,75	50,75	0,44;22,45	75	
Traço Normal	1	1,95	1,88			
Qtidade - T _N	60	117	112,80	0,568;49,70	70	
Qtidade - T _N	30	58,5	56,4	0,57;24,9	80	
Traço Pobre	1	2,75	2,42			
Qtidade - T _P	25	68,75	60,5	0,78;27,95	78/82	
Concreto C-ART50 - Os traços dos concretos foram executados em 2 rodadas						
	Cimento	Areia	B-1	ART	a/c; Água	Slump(mm)
Traço Rico	1	1,25	1,13	0,73		
Qtidade - T _R	35	43,75	39,55	25,55	0,40;17,42	78
Qtidade- T _R	35	43,75	39,55	25,55	0,43;18,42	78
Traço Normal	1	1,95	1,46	0,94		
Qtidade - T _N	30	58,5	43,8	28,20	0,548;20,35	90
Qtidade - T _N	30	58,5	43,8	28,20	0,545;19,85	78
Traço Pobre	1	1,25	1,88	1,21		
Qtidade - T _P	25	68,75	47,0	30,25	0,73;22,45	85
Qtidade - T _P	25	68,75	47,0	30,25	0,71;21,95	90

4.3.3.2 Traços adicionais executados

Em busca de novos resultados comparativos, foram definidos traços adicionais, com a perspectiva de ajudar a descobrir a amplitude de interferência do ART no concreto.

Os traços teóricos iniciais dos traços adicionais e seus consumos estão representados na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 – Traços adicionais iniciais e quantidade de materiais

Concreto C-B-1 Seqüência Invertida					
	Cimento	Areia	B-1	Água	a/c
Normal -T _B	1	1,95	2,92		0,54
Qtidade-T _B	20	39	58,4	10,80	
Concreto C-ART100 Seqüência Invertida – Os traços foram executados em 1 rodada					
Traço	Cimento	Areia	ART	Água	a/c
Normal -T _C	1	1,95	1,88		0,54
Qtidade-T _C	20	39	37,6	10,8	
Normal - T _D	1	1,95	1,88		0,54
Qtidade -T _D	20	39	37,6	10,8	
Normal -T _E	1	1,95	1,88		0,54
Qtidade-T _E	20	39	37,6	10,8	
Concreto C-ART100 Seqüência Normal - Os traços foram executados em 1 rodada					
Traço	Cimento	Areia	ART	Água	a/c
Normal -T _F	1	1,95	1,88		0,545
Qtidade - T _F	27,6 (2,4-f)	58,5	56,4	16,35	
Normal -T _G	1	1,95	1,88		0,545
Qtidade - T _G	30 (1,93)	58,5	56,4	16,35	

Os traços adicionais para os concretos com ART também foram definidos com substituição volumétrica da B-1 pelo ART.

Em virtude das dificuldades encontradas na produção dos concretos anteriores, com ART, decidiu-se inverter a ordem de mistura com o intuito de minimizar a interferência da

absorção do ART. No total foram produzidos 6 tipos diferentes de traços de concretos para as suas devidas análises.

- Concreto com agregado B-1, na seqüência invertida, no Traço Normal (tipo Normal em consumo de cimento) → denominado T_B .

Foi produzido também o concreto de referência, com B-1, no Traço Normal, e na seqüência invertida, para se poder comparar a nova série invertida.

Para a seqüência invertida, adotou-se: em primeiro lugar, fez-se a argamassa, ou seja, areia (100%), cimento (100%) e 80% de água de amassamento, posteriormente adicionaram-se a B-1 (100%) e o restante de 20% de água de amassamento. Obedecendo ao tempo estipulado de 5 minutos para misturar e realizar o ensaio do abatimento do tronco de cone, ajustando-se o traço em 80 ± 20 mm.

Foram, também, produzidos três traços, adicionando aditivo nos concretos com a seqüência invertida, com substituição total da B-1 por ART, conforme discriminação a seguir:

- Concreto com seqüência invertida, com substituição total da B-1 por ART, introduzindo aditivo depois de preparada a argamassa → denominado T_C .

Com o concreto de referência, no Traço Normal e seqüência invertida pronta, partiu-se para executar os concretos com 100% de ART, no Traço Normal e seqüência invertida. Com o procedimento de inversão para o ART, adotou-se a seguinte seqüência: primeiramente imprimou-se a betoneira, após colocou-se areia (100%), cimento (100%) e 80% da água de amassamento. Em seguida foi colocado o agregado reciclado de telha (ART), no estado ambiente, e 20% da água de amassamento. O resultado não foi bom, pois secou totalmente a betoneira, formaram-se muitas “pelotas” que não se desfaziam “ao rodar” a betoneira. Tentou-se moldar os corpos-de-prova, mas não foi possível. O vibrador não conseguia desfazer as pelotas. Resolveu-se, assim, para não perder o concreto, utilizar o aditivo da Fosroc “Conplast SP430” com quantidade em volume igual a 200 ml, ou seja, 1% da massa de cimento, segundo a prescrição do catálogo do fabricante. Observou-se que, ao colocar o aditivo, a mistura melhorou um pouco, mas não foi suficiente para apresentar a trabalhabilidade necessária. Havia muita desagregação e o aspecto “lubrificado” melhorou um pouco. Observou-se que as pelotas persistiam e não se

desfaziam. Assim, foi necessário acrescentar água para desmanchar as pelotas; colocando-se 50 % da água da Abs_{SSS} do ART e após mais 10% até que atingisse a consistência adotada de 80 ± 20 mm. O tempo gasto chegou a 25 minutos no total no procedimento da mistura. Na seqüência, moldaram-se os corpos-de-prova para serem rompidos nas idades programadas.

- Concreto com seqüência invertida, com substituição total da B-1 por ART, introduzindo o aditivo na argamassa → denominado T_D .

Para o traço T_D , foi adotado o mesmo procedimento do traço T_C , mas colocou-se o aditivo (na mesma proporção) na argamassa, ou seja, no início da mistura. A operação foi executada da mesma maneira, primeiramente misturou-se areia (100%), cimento (100%), 80% de água de amassamento e o aditivo (200 ml). Complementando, juntou-se o ART (100%) e o restante de 20 % da água de amassamento. Para chegar à consistência desejada, foi necessário adicionar quantidade de água relativa a 30% da Abs_{SSS} do ART, depois 15% da Abs_{SSS} , mais 15% Abs_{SSS} e finalmente 10% Abs_{SSS} , totalizando 70%. Finalizando a etapa, moldaram-se os corpos-de-prova.

- Concreto com seqüência invertida, com substituição total da B-1 por ART, umidificando o ART em 24 horas com 80% da sua absorção_{SSS} → denominado T_E .

Para o traço T_E , foi adotado o mesmo procedimento do traço T_D , no entanto umidificou-se o ART, com 80% de sua Abs_{SSS} , 24 horas antes da produção do concreto. A seqüência adotada para a mistura foi: primeiramente fez-se a argamassa, colocou-se a areia (100%), o cimento (100%), 70% de água de amassamento e o aditivo. Posteriormente acrescentou-se o ART umidificado e o restante da água de amassamento, até dar a consistência desejada. Moldaram-se em seguida os corpos-de-prova.

Prepararam-se também, agora na seqüência normal, dois traços com substituição total da B-1 por ART, um com substituição 8% de cimento por finos do ART e o outro com adição de cimento e água para atender a relação a/c do traço de referência com B-1. Estes dois traços são detalhados a seguir.

- Concreto com seqüência normal, com substituição integral da B-1 por ART e também com substituição de 8% da massa de cimento pelos finos do ART → denominado T_F.

Decidiu-se fazer esse traço adicional para se ter uma idéia da implicação dos finos do agregado reciclado de telha no concreto, em virtude de que o material estudado, o ART, apresentar atividade pozolânica, ainda que baixa, segundo Dias (2004).

Nesse traço substituiu-se 8% do cimento por finos do ART. Primeiramente, iniciou-se separando os materiais, os agregados, o cimento (27,6 kg) e os finos do ART (8% de 30 kg = 2,4 kg), totalizando os 30 kg de aglomerante. Imprimou-se a betoneira, introduziu-se o ART (100%) com quantidade de água referente a 80% da sua Ab_{SSS} , permaneceu por 2 minutos dentro da betoneira. A seguir foi posto o cimento (27,6 kg), os finos do ART e 50% da água de amassamento. Complementou-se com a areia (100%) e 50% de água de amassamento. Para finalizar, ajustou-se a água até dar a consistência de 80 ± 20 mm. Em seguida, moldaram-se os corpos-de-prova.

- Concreto com seqüência normal, com substituição integral da B-1 por ART, com adição de cimento e água para retornar a relação a/c inicial → denominado T_G.

Decidiu-se fazer esse traço adicional para comparar o concreto de referência com o concreto com ART, produzidos com a mesma relação a/c.

Para esse traço, adicionando cimento e água para atender à relação a/c do traço de referência, iniciou-se separando os materiais, os agregados miúdos e graúdos, cimento (30 kg com mais 1,32 kg para atender à relação a/c do traço de referência) e a água. Adotou-se a seguinte seqüência: imprimou a betoneira, em seguida colocou-se o ART (100%) com a quantidade de água equivalente a 80% da sua Ab_{SSS} , esperou por 2 min, e adicionou-se o cimento (31,32 kg) mais os 80% da quantidade de água referente ao amassamento (a/c), posteriormente a areia (100%) e os restantes 20% da água de amassamento. Depois de realizada essa mistura, foi determinado o abatimento de tronco de cone, que não atingiu a faixa estipulada de 80 ± 20 mm. Acrescentou-se, então, mais cimento (0,61 kg) e mais água até que retornasse à relação a/c do traço de referência e atendesse a consistência de 80 ± 20 mm. Com o traço ajustado moldaram-se os corpos-de-prova para os ensaios.

Na Tabela 4-8, apresentam-se os resultados finais dos traços adicionais, ou seja, os traços finais, as quantidades dos materiais, e o *slump* final.

Tabela 4-8 –Traços adicionais: traços finais, quantidades de materiais e abatimento de tronco de cone

Concreto C-B-1					
	Cimento	Areia	B-1	a/c;Água	Slump(mm)
Normal -T _B	1	1,95	2,92	0,54	85
Qtidade.-T _B	20	39	58,4	10,80	
Concreto C-ART100 Sequência Invertida – Os traços foram executados em 1 rodada					
Traço	Cimento	Areia	ART	a/c p.;Águat	Slump
Normal -T _C	1	1,95	1,88		80
Qtidade -T _C	20	39	37,6	0,54; 15,74	
Normal - T _D	1	1,95	1,88		
Qtidade-T _D	20	39	37,6	0,547; 16,15	76
Normal -T _E	1	1,95	1,88		
Qtidade -T _E	20	39	37,6	0,57; 16,56	95
Concreto C-ART100 Sequência Normal - Os traços foram executados em 1 rodada					
Traço	Cimento	Areia	ART	a/c p.;Águat	Slump
Normal -T _F	1	1,95	1,88		85
Qtidade - T _F	27,6 (2,4-f)	58,5	56,4	0,596;25,7	
Normal -T _G	1	1,95	1,88		74
Qtidade - T _G	31,93	58,5	56,4	0,545;25,23	

4.3.4 Moldagem, adensamento e cura dos corpos-de-prova.

Após a confecção dos concretos, moldaram-se os corpos de prova de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR 9479 (ABNT, 1994).

Adotou-se o adensamento mecânico com o vibrador com mangote de 25 mm, em duas camadas para os corpos de prova cilíndricos ($\Phi 15 \times 30$) e uma camada para os corpos prismáticos ($15 \times 15 \times 45$).

Na Tabela 4-9, apresenta-se o resumo dos tipos de corpos de prova, quantidades e idades de ensaios programados para todos os traços estudados, afora os traços adicionais. Nos traços adicionais foram realizados ensaios somente para a obtenção da resistência à compressão (f_c).

Tabela 4-9 – Resumo da quantidade de corpos-de-prova para cada tipo de traço × Idades

Propriedades	f_c		$f_{ct,sp}$		E_c		$f_{ct,f}$
	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d	28 d
15×30	2	2	2	2	2	2	-
15×15×45	-	-	-	-	-	-	2

Após a moldagem dos corpos de prova, colocaram-se os moldes sobre superfície horizontal rígida, livres de vibrações e de qualquer outra causa que pudesse perturbar os concretos.

A cura dos corpos-de-prova foi feita ao ar livre, nas primeiras 24 horas. A desmoldagem procedeu-se com 24 horas para os corpos-de-prova cilíndricos e 48 horas para corpos-de-prova prismáticos.

Depois de desmoldados, os corpos de prova dos concretos de referência foram curados no tanque com solução saturada de hidróxido de cálcio à temperatura (23 ± 2) °C, ficando assim até a data de ensaio.

Os corpos-de-prova dos concretos com ART foram curados por 14 dias no tanque e para completar os 28 dias, permaneceram no ambiente do laboratório.

A norma estipula que a temperatura do ar na câmara úmida ou da água no tanque deve ser mantida nos intervalos de (21 ± 2) °C, (25 ± 2) °C e ou (27 ± 2) °C, no entanto, as temperaturas variaram, conforme o estado do meio ambiente, mas ficaram entre 21 e 27°C.

4.4 MATERIAIS UTILIZADOS

Apresentam-se a seguir os materiais empregados no estudo e as normas de ensaios utilizadas na caracterização dos materiais. As normas utilizadas nos experimentos estão relacionadas na Tabela 4-10.

Tabela 4-10 – Propriedades avaliadas dos agregados e os métodos de ensaios

Propriedade	Norma	Título da Norma
	NBR 7211 (1983)	Agregado para concreto
Distribuição granulométrica	NBR 7217 (1987)	Agregados - Determinação da composição granulométrica
	NBR NM 248 (2003)	Agregados – Determinação da composição granulométrica
Forma e textura das partículas	NBR 7809 (1983)	Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro
Massa específica do agregado graúdo	NBR 9937 (1987)	Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo
	NBR NM 53 (2003)	Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água
Massa específica do agregado miúdo	NBR 9776 (1987)	Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman
	NBR 9777 (1987)	Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos
Massa unitária	NBR 7251 (1982)	Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária
Massa unitária	NBR 7810 (1983)	Agregado em estado compactado – Determinação da massa unitária
Massa específica	NBR NM 23 (2000)	Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica

4.4.1 Cimento

Para a produção dos concretos, optou-se por empregar o Cimento Portland CP II E 32, por ser o mais comum na região. Foram utilizados dois cimentos, o Ciminas e o Cauê, veja na Tabela 4-11 e Tabela 4-12. As características foram fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 4-11 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland

Propriedades químicas do CP II E – 32 Ciminas						
Composição química	Resultados - (09/2005)			Método do ensaio	Limites NBR 5732 (1991)	
P.F(%)	5,37			-	-	
SiO ₂ (%)	21,86			-	-	
R.I.(%0	1,10			-	-	
Al ₂ O ₃ (%)	6,40			-	-	
Fe ₂ O ₃ (%)	2,38			-	-	
CaO(%)	58,06			-	-	
MgO(%)	2,03			-	-	
SO ₃ (%)	1,37			-	-	
CO ₂ (%)	4,41			-	-	
K ₂ O(%)	0,71			-	-	
PF 500 °C	0,36			-	-	
C ₃ A(teórico)	5,77			-	-	
Propriedades físicas do CP II E – 32 Ciminas						
Tempo de Pega (min)	Início – 181			NBR 11581	≥ 60	
	Fim – 223				≤ 600	
Blaine (cm ² /g)	3962			NBR 7224	≥ 2800	
	27,3					
#325%	11,5			NBR 9202	-	
Propriedades mecânicas do concreto/Cimento CP II E – 32 Ciminas						
Resistência à Compressão (MPa)						
Tracos	1d	3 d	7d	28d		
TR:1:1,680:2,474:0,45	9,0	29,1	38,7	48,7	NBR 7215(1996)	≥ 10
TN:1:2,791:3,362:0,65	3,2	15,4	21,3	26,2	NBR 7215(1996)	≥ 20
TP:1:3,669:3,977:0,85	1,7	7,8	12	16,8	NBR 7215(1996)	≥ 32
Massa específica (kg/m³)						
Tracos	Massa específica (kg/m ³)					
TR:1:1,680:2,474:0,45	2349			-	-	
TN:1:2,791:3,362:0,65	2250			-	-	
TP:1:3,669:3,977:0,85	2202			-	-	

Tabela 4-12–Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland

Propriedades químicas do CP II E – 32 Cauê			
Composição química	Resultados - (04/2006)	Método do ensaio	Limites NBR 5732 (1991)
P.F(%)	5,00	-	-
SiO ₂ (%)	23,00	-	-
Al ₂ O ₃ (%)	6,90	-	-
Fe ₂ O ₃ (%)	1,98	-	-
CaO(%)	59,5	-	-
MgO(%)	2,80	-	-
SO ₃ (%)	2,00	-	-
Na ₂ O(%)	0,37	-	-
K ₂ O(%)	1,10	-	-
C ₃ S(adm)	34,2	-	-
C ₂ S(adm)	8,55	-	-
C ₃ A(adm)	4,62	-	-
C ₄ AF(adm)	4,79	-	-
Propriedades físicas do CP II E – 32 Cauê			
Tempo de Pega (min)	Início – 240/200 ¹	NBR NM 65 (03)	≥ 60
	Fim – 336/260 ²	NBR NM 65 (03)	≤ 600
Blaine (cm ² /g)	3364	NBR NM 76 (98)	≥ 2800
Massa específica - kg/m ³	3000 ³	NBR NM 23 (00)	-
Índice de Finura (%)	2,3 ⁴	NBR 12826 (93)	-
Propriedades mecânicas do concreto/Cimento CP II E – 32 Cauê			
Resistência à Compressão (MPa)			
R3	22,0/15,93 ⁵	NBR 7215(1996)	≥ 10
R7	28,8/22,47 ⁶	NBR 7215(1996)	≥ 20
R28	36,5/28,71 ⁷	NBR 7215(1996)	≥ 32

Nota: Os sobrescritos 1,2,3,4,5,6,7 são dados calculados no laboratório FECIV e os dados restantes são do fabricante do cimento Cauê, proveniente do laboratório de análises da fábrica de Ijaci-MG.

Na Tabela 4-11 apresentam-se as propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento Ciminas que foi empregado primeiramente para ajustar o teor de argamassa. O fabricante

do cimento Ciminas é a empresa Holcim, que além de enviar o laudo das propriedades, doou os cimentos para esses experimentos.

Já a Tabela 4-12, refere-se às propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II E - 32 da marca Cauê. Como o cimento Ciminas não foi encontrado no comércio local durante o período dos experimentos, a alternativa foi substituí-lo pelo cimento Cauê, que também é um dos mais comumente utilizados na região. Na caracterização desse cimento, foram feitos alguns ensaios no laboratório da FECIV, conforme se registra na Tabela 4-12. Foram inseridos também, os valores estabelecidos das propriedades físicas, químicas e mecânicas fornecidos pelo fabricante, que emitiu o certificado de análises do laboratório da fábrica de Ijaci –MG.

4.4.2 Agregados - Distribuição granulométrica

4.4.2.1 Agregado miúdo natural

Foi utilizada a areia grossa lavada, proveniente do porto do Rio Dourado, Município de Abadia dos Dourados/MG. As areias denominadas “Bom Jesus” e “Areia Volta Grande” provieram do mesmo porto e ambas foram utilizadas na confecção dos concretos de referência e reciclados; a diferença é que foram adquiridas de dois fornecedores. Apresentam-se a seguir as distribuições granulométricas das areias na Tabela 4-13 e as curvas de distribuições granulométricas na Figura 4.3.

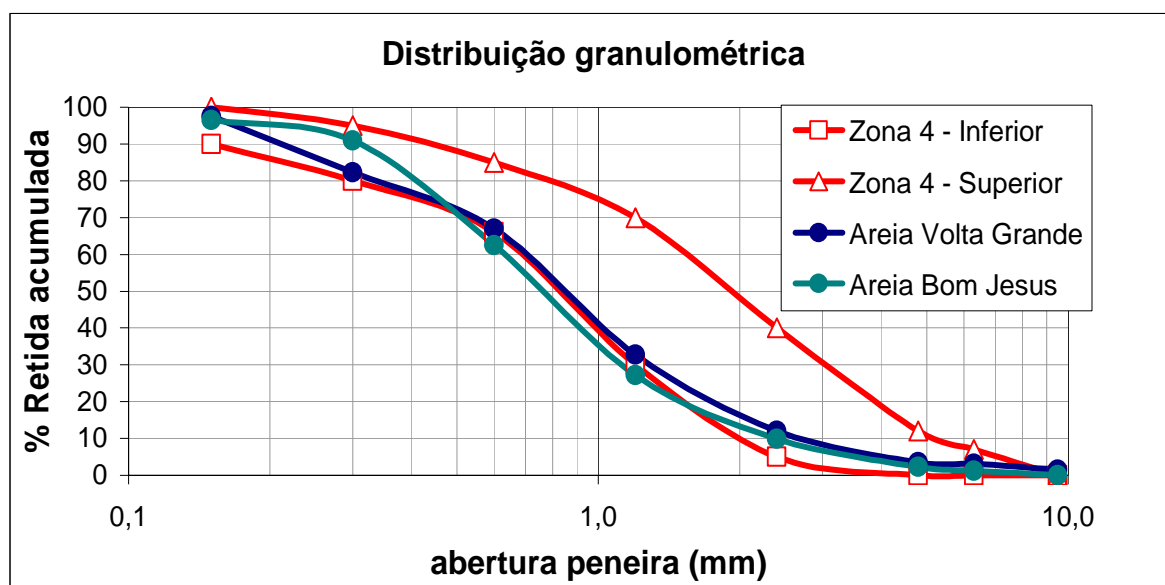


Figura 4.3 – Curvas de distribuição granulométrica dos agregados miúdos naturais da AVG e BJ

Como se observa na Tabela 4-13, as características das areias se aproximam nas composições granulométricas e os módulos de finura praticamente são iguais (2,9 e 2,97).

Tabela 4-13– Agregado miúdo natural: Bom Jesus e Areia Volta Grande

Agregado miúdo natural (B. Jesus) NBR 7217 (1987) / NBR 7283 (1983)			Agregado miúdo natural (AVG) NBR 7217 (1987) / NBR 7283 (1983)		
Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada	Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
9.5	0.1	0	9.5	1.5	2
6.3	1.2	1	6.3	1.6	3
4.8	1.0	2	4.8	0.4	3
2.4	7.6	10	2.4	8.5	12
1.2	17.3	27	1.2	20.7	33
0.6	35.3	63	0.6	34.3	67
0.3	28.4	91	0.3	15.3	82
0.15	5.5	96	0.15	15.2	98
Fundo (≤ 0.15)	3,5	100	Fundo (≤ 0.15)	2,5	100
Total	100	-	Total	100	-
Módulo de Finura	2,9		Módulo de Finura	2,97	
Dmáx.(m m)	4,8		Dmáx.(m m)	4,8	
Graduação	Zona 4 (areia grossa)		Graduação	Zona 4 (areia grossa)	

4.4.2.2 Agregado graúdo natural (B-1) e agregado graúdo reciclado de telha (ART)

Agregado graúdo natural: utilizou-se a brita de origem basáltica, proveniente da pedreira de basalto da Britagem, Indústria e Construção Ltda (Empresa CTR) em Uberlândia.

Agregado graúdo reciclado: O agregado reciclado graúdo de telha cerâmica foi obtido por Dias (2004) da britagem de resíduos de telhas de cerâmica vermelha, provenientes de diversas fábricas de Monte Carmelo/MG, cuja ilustração está na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Agregado graúdo reciclado de telha de cerâmica vermelha - ART

Na Figura 4.5 apresenta-se a curva de distribuição granulométrica do agregado reciclado de telha (ART).

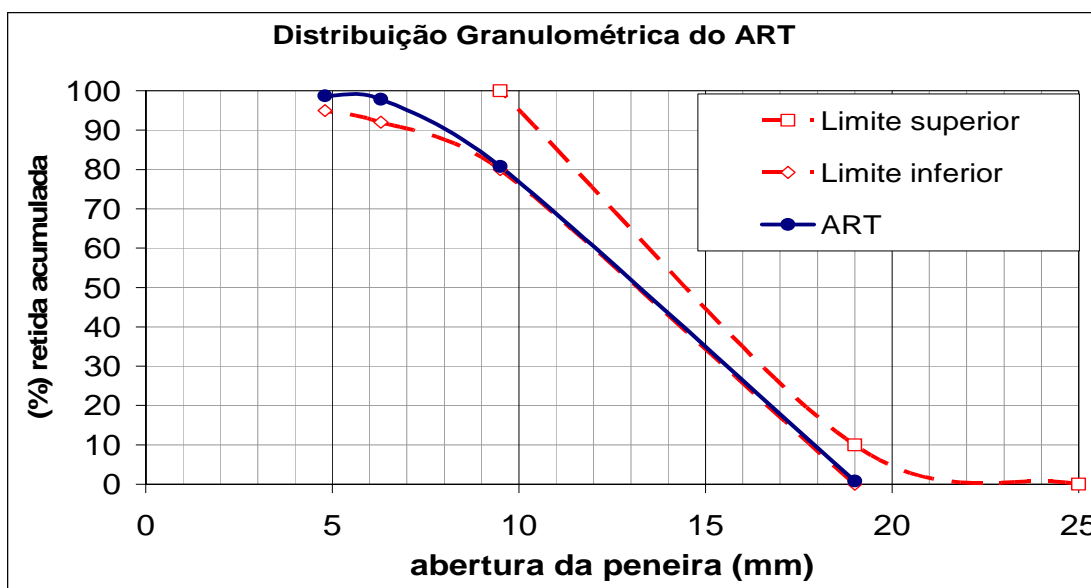


Figura 4.5 – Curva de distribuição granulométrica do agregado reciclado de telha (ART)

Para verificar se o agregado reciclado de telha estava com excesso de impurezas e materiais finos, lavou-se o material e fez-se o ensaio de peneiramento para a determinação da composição granulométrica do ART lavado. Na Figura 4.6, ilustram-se as curvas de distribuição granulométrica do ART “in natura” e “lavado”, mostrando que não se alterou e na Tabela 4-14 apresentam-se as distribuições granulométricas do ART e ART lavado. A

pequena diferença entre as curvas ficou por conta dos “finos”, provavelmente aderidos aos grãos maiores.

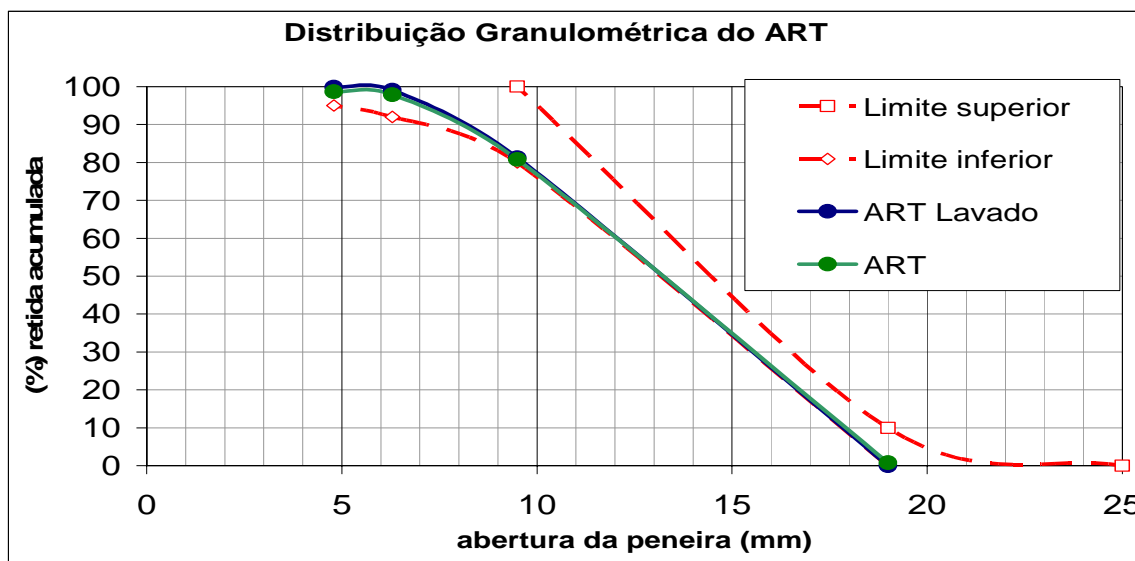


Figura 4.6 – Curva de distribuição granulométrica do ART e ART lavado

Tabela 4-14 – Composição granulométrica do agregado reciclado de telha

ART			ART Lavado		
Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada	Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
25.00	0.1	0	25.00	0	0
19.00	0.8	1	19.00	0	0
12.50	43.4	44	12.50	43.7	44
9.5	33.6	78	9.5	36.6	80
6.3	16.5	94	6.3	17.6	98
4.8	0.8	95	4.8	0.8	99
2.4	2.1	97	2.4	1.2	100
1.2	0.6	98	1.2	0	100
0.6	0.4	98	0.6	0	100
0.3	0.3	98	0.3	0	100
0.15	0.3	99	0.15	0	100
Fundo (< 0.15)	1,3	100	Fundo (< 0.15)	0,2	100
Total	100	-	Total	100	-
M. de Finura	6,64		M. de Finura	6,78	
Dmáx.(m m)	19.0		Dmáx.(m m)	19.0	

Com efeito, para se produzirem concretos com agregados reciclados, o melhor seria, para termos comparativos, que o agregado reciclado tenha a mesma distribuição granulométrica do agregado gráudo natural. Como isto não foi possível, procurou-se encontrar uma brita natural com distribuição granulométrica que se aproximasse daquela do agregado reciclado de telha.

Ressalta-se que a intenção neste trabalho foi a de se utilizar o ART da forma como foi produzido. Buscou-se, assim, um agregado gráudo natural com distribuição granulométrica parelha.

Pesquisou-se no mercado local e, após algumas tentativas, conseguiu-se a B-1 oriunda da empresa CTR. Os dois agregados gráudos apresentaram distribuições granulométricas semelhantes e enquadraram na faixa de B-1 da norma NBR 7211 (ABNT, 1983). Na Figura 4.7 estão apresentadas as duas curvas de distribuição granulométricas, juntas do ART e da B-1 e na Tabela 4-15 registram-se suas composições granulométricas.

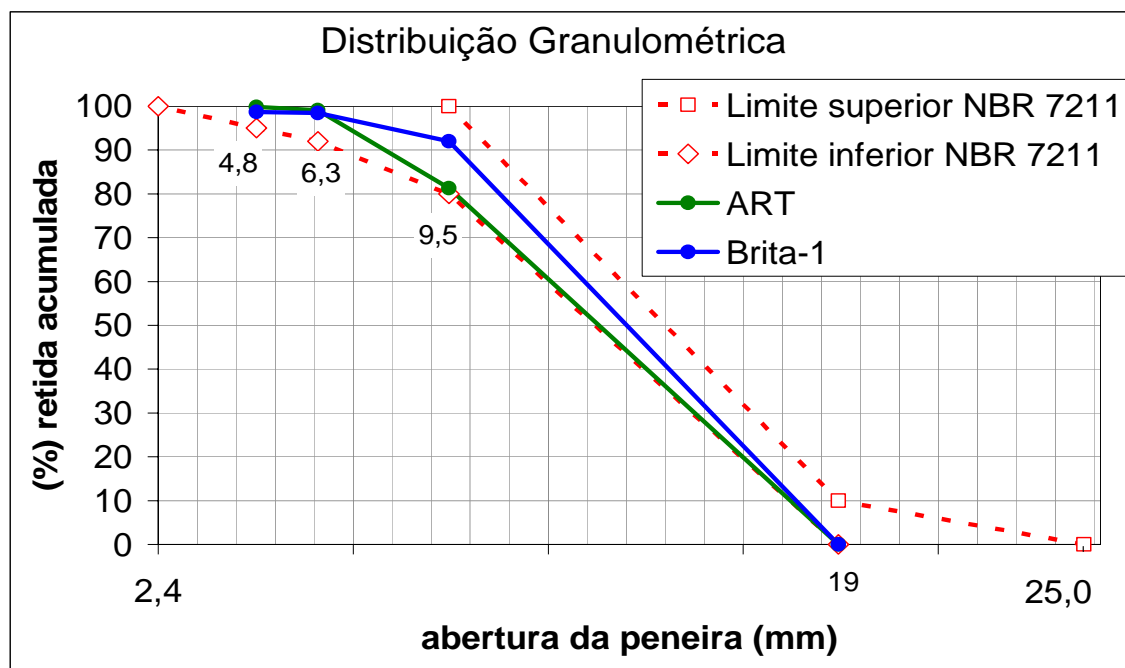


Figura 4.7 – Curvas de distribuição granulométrica do ART e da Brita 1

O módulo de finura da Brita 1 e do ART lavado foram 6,8 e 6,78, respectivamente, ou seja, o agregado gráudo reciclado apresentou módulo de finura ligeiramente menor que o agregado natural.

Tabela 4-15 – Composições granulométricas dos agregados B-1 e ART

Brita 1 CTR			ART Lavado		
Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada	Peneiras (mm)	% retida	% retida acumulada
12.50	53.9	54	12.50	43.7	44
9.5	36.9	91	9.5	36.6	80
6.3	6.3	97	6.3	17.6	98
4.8	0.2	97	4.8	0.8	99
2.4	0.6	98	2.4	1.2	100
1.2	0.1	98	1.2	0	100
0.6	0.2	98	0.6	0	100
0.3	0.2	98	0.3	0	100
0.15	0.2	99	0.15	0	100
Fundo (< 0.15)	1,3	100	Fundo (< 0.15)	0,2	100
Total	100	-	Total	100	-
Módulo de Finura	6,8		Módulo de Finura	6,78	
Dmáx.(m m)	19.0		Dmáx.(m m)	19.0	
Graduação	Class.1 (B-1)		Graduação	Class.1 (B-1)	

4.4.3 Agregados – Índice de forma

O índice de forma é determinada para agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, como prescreve a NBR 7809 (ABNT, 1983) e é representado pela razão entre o comprimento e a espessura dos grãos medidos.

Os resultados do ensaio de índice de forma dos agregados estão apresentados na Tabela 4-16.

Tabela 4-16 – Resultados do ensaio do índice de forma dos agregados

Agregado graúdo	B-1	ART
Índice de forma	2,76	2,57

A NBR 7211 (ABNT, 1983), que especifica agregados para concreto, prescreve que o índice de forma dos agregados não deve ser superior a 3.

Os resultados também indicam que esses agregados utilizados podem ser classificados como lamelares.

4.4.4 Agregados - massa específica, massa unitária e absorção

A determinação da massa específica é muito importante para a dosagem de concreto, pois conhecendo o seu resultado será possível calcular o consumo de materiais utilizados para produção das misturas. Já para a massa unitária é útil na tecnologia do concreto para a conversão de traços em massa para traços em volume, e ainda o seu valor tem utilidade na determinação da porosidade do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os resultados dos ensaios da massa específica, massa unitária e absorção se registram na Tabela 4-17.

Tabela 4-17 – Resultados da massa específica, massa unitária e absorção dos agregados

Fração granulo métrica	Tipo de material	ρ_s^1 (kg/m ³)	ρ_{sss}^2 (kg/m ³)	δ^3 (kg/m ³)	δ^4 (kg/m ³)	Abs (%)
Miúdo	Areia	2600	-	1455	-	
Graúdo	B-1	2810	2860	1470	1510	1,85
	ART	1810	2150	994	-	17,5

Nota: O sobrescrito 1: se refere à massa específica; sobrescrito 2: se refere à massa específica saturada de superfície seca; o sobrescrito 3: refere-se à massa unitária no estado solto seco; sobrescrito 4: refere-se ao valor da massa unitária em estado compactado seco (MCU).

Observa-se que o ART apresenta massa específica bem mais baixa do que a da B-1, neste caso a ρ_{ART} representa 64,4% da ρ_{B-1} .

Na Tabela 4-18, a título de ilustração da amplitude de variação da massa específica de massas cerâmicas, apresentam-se alguns valores referentes às massas cerâmicas produzidas com argilas em diferentes regiões.

Tabela 4-18-Massa específica, Absorção de água e porosidade de massas cerâmicas

Argila(s) - procedência	Massa específica (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Porosidade (%)	Fonte
Campo dos Goytacazes-RJ	1,68 – 1,84	18,8 – 22,0	34,8 – 37,4	Alexandre, J. et al (2001)
Campo dos Goytacazes-RJ	1,80	17,5	-	Oliveira, G.I. et al (2001)
Rio Verde de Mato Grosso	1,98	15,8	-	Rebmann, M.S. et al (2001)
Goiânia-GO	1,77	21,24	37,73	Menezes, R.R. et al (2001)
Bariri-SP	1,75 -1,81 - 1,82	21,2-14,5-20,2	37,2-27,9-36,4	Santos, P.S. (1975)
Monte Carmelo-MG	1,7 – 2,1	15,1 – 22,9	28,6 – 37,5	Kozievitch <i>et al.</i> (2000)
ART	1,81	17,1	32,5	Ensaios realizados

Fonte: Dias (2004)

Os resultados obtidos para o ART confirmam a baixa densidade do agregado reciclado, que corresponde aos valores encontrados na bibliografia consultada.

Desde já, então, prevê-se que, devido à baixa densidade, há necessidade da compensação das massas de material reciclado a serem utilizados nos traços de concreto, para que não haja diferença muito grande nos volumes dos materiais.

4.4.4.1 Absorção do ART

A absorção é uma propriedade muito importante para ser avaliada na produção de concretos. Com o objetivo de descobri-la, buscou-se pesquisar sobre o agregado graúdo reciclado e constatou-se que não seria possível utilizar a norma que determina a Absorção NBR 9937 (ABNT, 1987), usada para o agregado graúdo natural, pois o material reciclado é muito poroso e frágil. Devido a essas características, seria muito difícil proceder à secagem superficial do material, sem desagregá-lo e muito menos ter a certeza de que as águas dos poros internos mais superficiais não estariam sendo retiradas do processo de secagem, mascarando, por consequência, os resultados a serem obtidos.

Portanto, como já se comentou anteriormente, Dias (2004b) desenvolveu uma tecnologia para determinar a absorção do ART, sendo este trabalho a continuação do seu estudo, assim aplicou-se também essa metodologia.

De acordo com procedimento adotado por Dias (2004b), o valor da absorção do ART na condição saturado superfície seca, adotada para esta pesquisa, foi de 17,5%, como pode ser visto no gráfico da Figura 4.8.

Em virtude da aridez do ART pela água e para melhor caracterizar seu comportamento no momento de se processar a mistura do concreto, decidiram-se realizar ensaios para determinar a taxa de absorção de água com o tempo de contato do agregado com ela.

O ensaio foi realizado, imergindo em água a massa seca do ART, contida em um cesto metálico, monitorando a variação da massa na balança hidrostática acoplada com resolução de 0,1g.

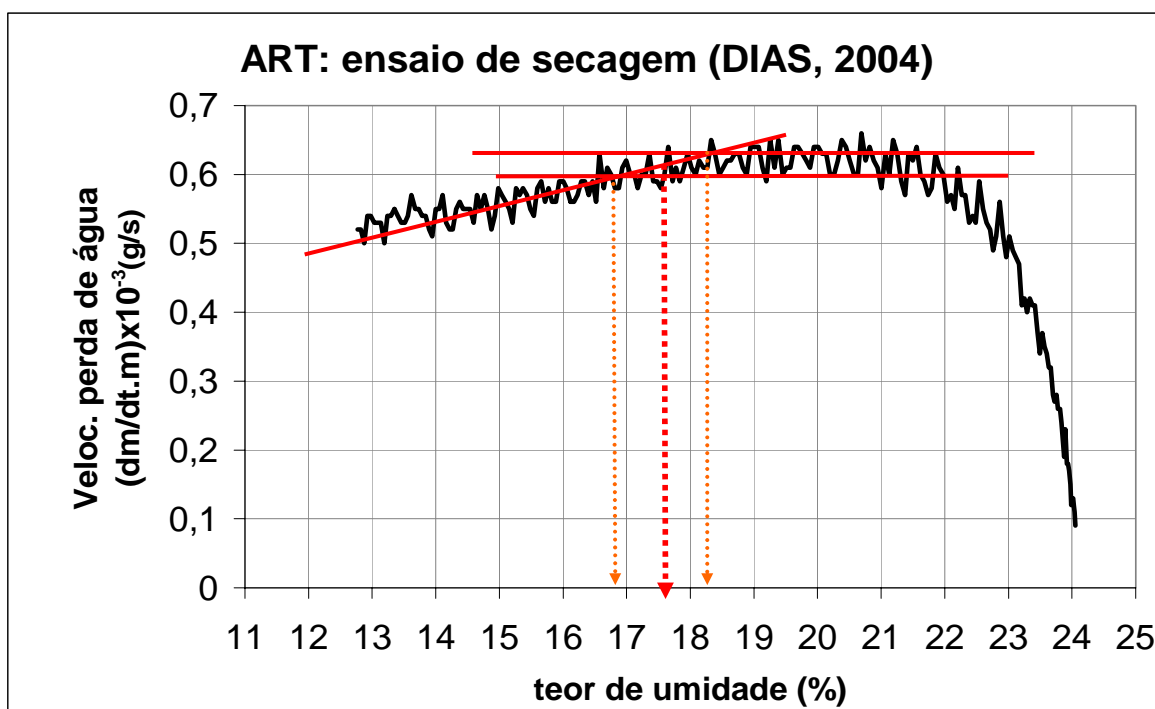


Figura 4.8 – Curva de secagem: velocidade da perda de água × teor de umidade (%)

Foram realizados três ensaios, com leituras de 30 em 30 segundos até completar 30 minutos; também se fez de 5 em 5 minutos até completar 1 hora e de hora em hora até completar 6:30 horas. Na Figura 4.9 ilustra-se o ensaio realizado.



Figura 4.9 – Ensaio de saturação do ART: Amostra do agregado submersa com balança acoplada para o ensaio hidrostático

Verifica-se na Figura 4.10, que o ART atingiu aproximadamente um teor de umidade que representa 90% da sua absorção_{sss}, com 3 minutos de imersão.

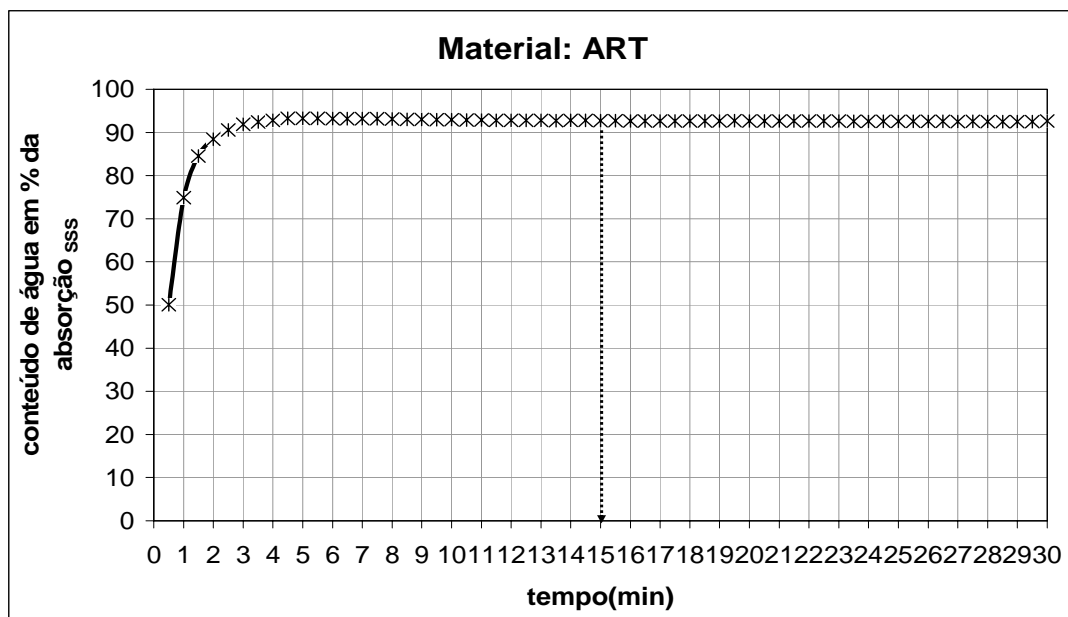


Figura 4.10 – Conteúdo de água em percentual da absorção_{sss} do ART em função do tempo de imersão decorrido

No gráfico da Figura 4.11, representa-se a curva da velocidade de ganho de massa de água em função do tempo, mostrando que após 5 minutos de imersão, a velocidade de ganho de água é muito baixa e próxima a zero.

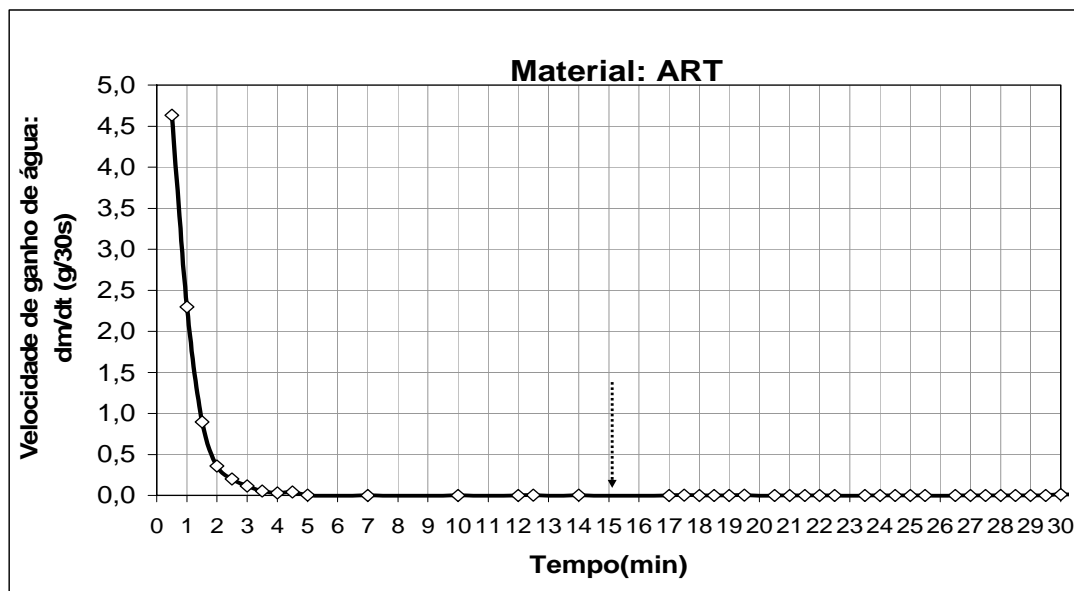


Figura 4.11 – Velocidade de ganho de massa de água em função com tempo (variação diferencial da massa de água em gramas para cada 30 segundos de imersão)

Resolveu-se, ainda, comprovar o ganho de água fazendo o ensaio na própria betoneira, ou seja, lançando o ART juntamente com a água dentro desta, para verificar como ocorreria o processo de ganho de água nos tempos decorridos de 1 ½ minuto, 3 minutos e 5 minutos. A Tabela 4-19 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4-19- Ganho de água do ART com o tempo na Betoneira

Amostra	Tempo t (min.)	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	% de água absorvida ¹	%Abs ÷ Abs _{SSS} ²
1	1 1/2	3847,8	3342,2	15,13	86,5
2	3	3634,8	3143,0	15,65	89,4
3	5	3557,3	3064,4	16,08	91,9

Notas - sobrescrito 1: é a percentagem da água absorvida no tempo t (relação entre massas); sobrescrito 2: %Absorvida ÷ Abs_{SSS} do ART.

Nos resultados obtidos da Tabela 4-19, observa-se que o ART realmente consome água rapidamente, confirmando então, o ensaio de ganho de água em imersão, no qual em 3 minutos o agregado reciclado atingiu 90% da sua absorção_{SSS}.

Concluindo, assim, em obras comuns, pode-se admitir que para um tempo médio de preparação do concreto na betoneira, entre 10 a 15 minutos, verifica-se que o agregado reciclado utilizado estaria no máximo com 92% da sua absorção_{SSS} atendida (conforme Figura 4.10) e que, em virtude da baixa taxa de sucção de água, não atingiria o preenchimento total de seus poros até o momento da aplicação do concreto, conseqüentemente não interferindo na água de amassamento, caso tenha sido atendida a sua capacidade de sucção.

Nessa análise, ressalta-se que não está se levando em consideração ao preparar o concreto, que a água não está totalmente disponível, pois está combinada com o cimento em suspensão, e também está submetida à atração eletrostática. Assim, admitiu-se que, quando o agregado reciclado é utilizado com os outros materiais, não absorverá 90%, mas menos, talvez 80% da sua absorção_{SSS}. Esta constatação vem ao encontro da recomendação da norma NBR 15116 (ABNT, 2004) de pré-molhagem com 80% da quantidade de água para se prevenir da absorção mais elevada do agregado reciclado.

No próximo capítulo relata-se a análise e discussão dos resultados dos concretos no estado fresco.

CAPÍTULO 5

ESTADO FRESCO - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos no estado fresco. Os procedimentos utilizados para a preparação dos concretos foram definidos no item 4.3.3 , tendo como referência a preparação dos concretos com agregado natural (B-1). Esses procedimentos foram também, inicialmente adotados para a preparação dos concretos com agregado reciclado de telha (ART), em substituição parcial e total da B-1, mas foram adaptados em virtude das particularidades desse agregado reciclado.

5.1 CONSUMO DE ÁGUA

Para a produção dos concretos de referência (com agregado basáltico B-1) adotou-se o método de dosagem segundo Helene e Tezian (1992). Pelo método, necessita-se de 3 traços para obter o diagrama de dosagem. Assim, definidos os 3 traços de referência, produziram-se os concretos, usando a seqüência empregada no procedimento, que foi a seguinte: imprimação da betoneira; agregado graúdo; 80% da água de amassamento, após colocou-se cimento; 20% da água de amassamento e finalmente areia e acréscimo de água para ajuste do *slump*.

Dando continuidade aos procedimentos depois da dosagem dos concretos de referência, passou-se para a produção dos concretos com agregados reciclados com substituição da B-1 por 100% ART (C-ART100) e 50% ART (C-ART50). Primeiramente, determinou-se o teor de umidade do ART que resultou em 1%. Posteriormente, iniciou-se o procedimento para obterem-se os concretos com substituição da B-1 pelo agregado reciclado, adotando-se assim o mesmo procedimento da seqüência de produção dos concretos de referência.

Inicialmente, utilizando a seqüência mencionada e deixando para acertar a quantidade de água necessária ao final da mistura, observou-se a dificuldade de proporcionar uma mistura uniforme. Verificou-se que havia aderência de argamassa nas paredes da betoneira, que se formavam grumos e pelotas de cimento, que só se desmanchavam com acréscimo de água e em tempos demorados de mistura, o que poderia prejudicar a qualidade do concreto, caso se prolongasse a preparação além do tempo desejado.

Concluiu-se que a seqüência para os traços dos concretos C-ART100 e C-ART50 não poderia ser a mesma empregada para os concretos de referência, pois dificultava a obtenção de uma mistura uniforme no tempo adequado de mistura.

Posteriormente, ao agregado reciclado foi adicionada quantidade de água referente à sua absorção, buscando-se prepará-lo no estado saturado com a superfície seca, com o intuito de preservar a água de amassamento, ou seja, considerar-se o consumo efetivo de água. Observou-se que esta providência é difícil de ser controlada, pois na betoneira, nem todas as partículas têm a mesma oportunidade de entrar em contato com a água, que por sua vez, acumula no fundo e perde-se também um pouco nas paredes e paletas internas do equipamento; como consequência observou-se, no agregado, inúmeras partículas secas e outras com excesso de água. Dessa forma, concluiu-se que o estado saturado superfície seca é difícil de ser estabelecido durante o preparo do concreto e deve ser um complicador em canteiros de pequenas obras.

Na Figura 5.1, ilustra-se primeiramente na foto (a) como ficou o aspecto do ART na tentativa de prepará-lo no estado saturado superfície seca, o que acabou resultando em grande quantidade de grãos secos e outros com excesso de água; e na outra ilustração (b) visualiza-se a formação de pelotas de cimento na seqüência da preparação, utilizando inicialmente 80% de água de amassamento (ou seja, 80% da relação a/c).

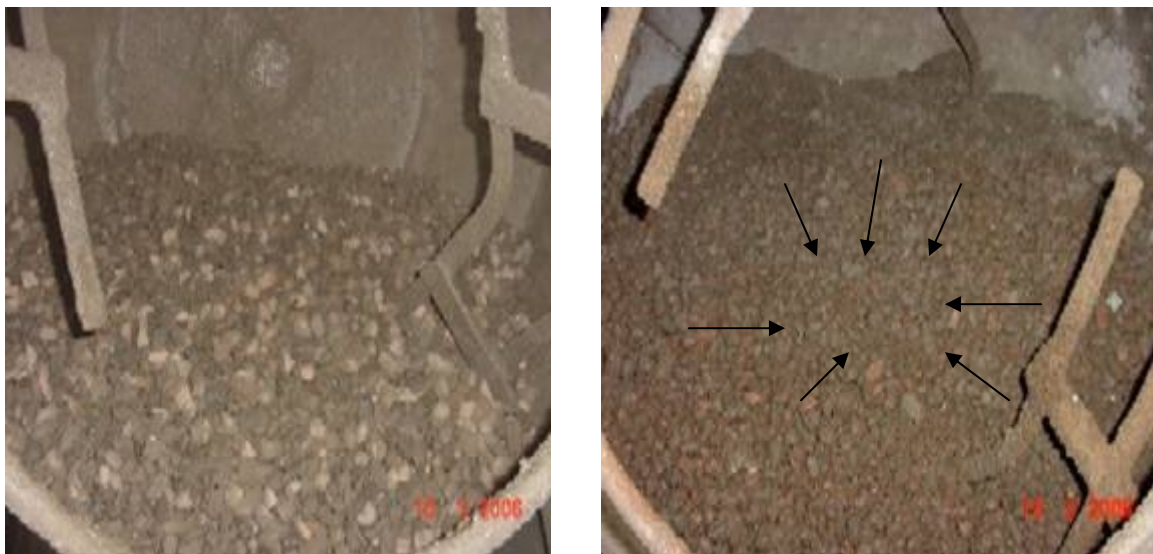


Figura 5.1 – a) aspecto do ART quando se procurou deixá-lo no estado saturado superfície seca; b) Ilustração da formação de pelotas e grumos de cimento ao se preparar o concreto com ART na mesma seqüência de mistura dos concretos com B-1

Com estas constatações, decidiu-se alterar a seqüência de mistura, o que foi feito levando em consideração as informações das Figura 4.10 e Figura 4.11. Decidiu-se, então, proceder à execução das misturas do ART da seguinte forma: primeiramente a imprimação da betoneira, colocando o agregado ART e 80% da água necessária para atender a sua absorção, com 1 ½ minuto de espera, em seguida 80% da água de amassamento, o cimento, finalizando com a areia, 20% da água de amassamento e acréscimo de água, caso necessário, até que fosse atingido o *slump* requerido. Desta forma, foi estabelecida a utilização de 80% da água de absorção do agregado reciclado, a exemplo da recomendação da NBR 15116 (ABNT, 2004). Neste trabalho, esta seqüência de mistura será denominada “seqüência normal”.

Adotando esse procedimento, observou-se que não se formaram pelotas de cimento, tampouco houve aderência do cimento nas paredes da betoneira, o que facilitou muito o processo, e acabou proporcionando misturas mais uniformes. Assim, foram preparados todos os traços com agregado reciclado (ART).

Apresentam-se, na seqüência, os resultados dos consumos de água obtidos no preparo dos concretos com agregado reciclado.

5.1.1 Consumo de água dos concretos C-ART100

Os traços rico, normal e pobre (cada um deles) foram divididos em 2 etapas para facilitar a mistura, pois com quantidades maiores de materiais, a mistura na betoneira ficava dificultada.

5.1.1.1 Cálculo do consumo de água para o Traço Rico 1ª. Etapa

a) Traço com 100% de ART (C:A:ART:a/c) → 1: 1,25 : 1,45 : 0,40 → para duas rodadas ficaram estabelecidas as quantidades em kg → 35 : 43,75 : 50,75 : 14,0

b) Para a relação a/c = 0,40 (considerada aqui a relação a/c inicial provável), o consumo de água seria 14,0 kg; o consumo de água total utilizado para este traço foi 21,5 kg.

Dessa forma, resultou uma diferença de $C_{\text{água total utilizado}} - C_{\text{água (a/c)}} = 21,50 - 14 = 7,5$ kg, que foi a água além daquela necessária para atender a relação a/c inicial provável.

c) Cálculo da massa seca do ART → $50,75 - 0,5075 = 50,24$ kg.

d) Cálculo da quantidade de água acrescentada para atender 80% daquela correspondente à Abs_{SSS} do ART (17,5%). Neste caso o consumo de água para a Absorção do ART (total teórica) seria = $50,24 \times 17,5/100 = 8,79$ kg.

No entanto, adotando 80% (em função da análise dos dados das figuras 4.12 e 4.13) → $80 \times 17,5 \div 100 = 14\% \rightarrow 14 \times 50,24 \div 100$, conclui-se que 7,03 kg de água foram provavelmente consumidos (absorvidos) pelo ART durante a mistura.

e) Fazendo-se a diferença, $7,5 - 7,03 = 0,47$ kg, verifica-se que houve um acréscimo provável de 0,47 kg de água na água de amassamento (aquela que corresponde à relação a/c).

f) Calculando-se $7,5/50,24 = 14,93$, assim dividindo-se pela Abs_{SSS} $14,93 / 17,5 = 85,31\%$ da água de Abs. Nesse caso, é provável que o ART tenha absorvido uma quantidade de água que representa 85,31% da sua absorção_{SSS}.

Portanto, $14,00 + 0,47 = 14,47$ kg, resultando na relação a/c $\rightarrow 14,47/35 = 0,41$, que é um pouco maior do que a a/c inicial provável.

g) **Então, a relação a/c final, provável para o Traço Rico na 1ª etapa foi 0,41.**

Apresentam-se na Tabela 5-1, os resultados dos cálculos dos consumos de água dos concretos com 100% de ART, de acordo com a descrição nos itens (a) até (g) do item 5.1.1.1.

Tabela 5-1-Cálculo dos consumos de água dos concretos C-ART100

Traços	a/c _{inicial} , provável	C _{água} inicial (kg)	C _{água} total utilizado (kg)	C _F ¹ (kg)	Massa Seca (kg)	C _{100%} da Abs ART (kg)	C _{80%} da Abs ART (kg)	C _H ² (kg)	C _J ³ (kg)	a/c _{final} , provável ⁴
C-ART100 – Traço Rico $\rightarrow 1:1,25:1,45:0,4 \rightarrow 35:43,75:50,75:14,0$										
T _R 1ª	0,4	14,0	21,0	7,5	50,24	8,79	7,03	0,47	14,47	0,41
T _R 2ª	0,4	14,0	22,45	8,45	50,24	8,79	7,03	1,42	15,42	0,44
C-ART100 – Traço Normal $\rightarrow 1:1,95:1,88:0,545 \rightarrow 60:117:112,8:32,7$										
T _N 1ª	0,545	32,7	49,7	17,0	117,67	19,54	15,63	1,37	34,07	0,568
C-ART100 – Traço Normal $\rightarrow 1:1,95:1,88:0,545 \rightarrow 30:58,50:56,4:16,35$										
T _N 1ª	0,545	16,35	24,9	8,55	55,84	9,77	7,81	0,74	17,09	0,57
C-ART100 – Traço Pobre $\rightarrow 1:2,75:2,42:0,678 \rightarrow 25:68,75:60,50:16,95$										
T _P 1ª	0,678	16,95	27,95	11,0	59,9	10,48	8,39	2,61	19,56	0,78
T _P 2ª	0,678	16,95	27,95	11,0	59,9	10,48	8,39	2,61	19,56	0,78

Nota: sobrescrito 1: $C_F = C_{\text{água total utilizado}} \text{ (kg)} - C_{\text{água inicial}} \text{ (kg)}$; sobrescrito 2: $C_H = C_F \text{ (kg)} - C_{80\% \text{ da Abs ART}} \text{ (kg)}$; sobrescrito 3: $C_J = C_{\text{água inicial}} \text{ (kg)} + C_H \text{ (kg)}$; sobrescrito 4: $a/c_{\text{final, provável}} = C_J \text{ (kg)} / \text{consumo de cimento do traço}$.

5.1.2 Consumo de água dos concretos C-ART50

Da mesma forma, os traços rico, normal e pobre (cada um deles) foram divididos em duas etapas, para facilitar a mistura.

5.1.2.1 Cálculo do consumo de água para o Traço Rico – 1ª. etapa

a) Traço com 50% de ART (C:A:ART:a/c) → 1: 1,25 : 1,125 : 0,73 : 0,40 → para duas rodadas ficaram estabelecidas as quantidades em kg → 35 : 43,75 : 39,375 : 25,55 : 14,0

b) Para a relação $a/c = 0,40$ (considerada aqui a relação a/c inicial provável), o consumo de água seria 14,0 kg; o consumo de água total utilizado para este traço foi 17,42 kg.

Dessa forma, resultou uma diferença de $C_{\text{água total utilizado}} - C_{\text{água (a/c)}} = 17,42 - 14 = 3,42$ kg, que foi a água além daquela necessária para atender a relação a/c inicial provável.

c) Cálculo da massa seca do ART → $25,55 - 0,2555 = 25,30$ kg

d) Cálculo da quantidade de água acrescentada para atender 80% daquela correspondente à Abs_{SSS} do ART (17,5%). Nesse caso, o consumo de água para a Absorção do ART (total teórica) seria $= 25,30 \times 17,5/100 = 4,43$ kg.

No entanto, adotando 80% (em função da análise dos dados das figuras 4.12 e 4.13) → $80 \times 17,5 \div 100 = 14\% \rightarrow 14 \times 25,30 \div 100$, conclui-se que 3,54 kg de água provavelmente foram consumidos (absorvidos) pelo ART durante a mistura.

e) Fazendo-se a diferença, $3,54 - 3,42 = 0,12$ kg, verifica-se que 0,12 kg de água a menos do que a necessária para 80% Abs_{SSS} ART.

f) Calculando-se $3,42/25,30 = 13,52$, assim dividindo-se pela Abs_{SSS} $13,52/17,5 = 77,26\%$ da água de Abs. Nesse caso, é provável que o ART tenha absorvido uma quantidade de água que representa 77,36% da sua Abs_{SSS} . Portanto, resultando na relação $a/c \rightarrow 14,0/35 = 0,40$, que é igual a a/c inicial, provável.

g) Então, a relação a/c final, provável para o Traço Rico na 1ª etapa foi 0,40.

Apresentam-se, na Tabela 5-2, os resultados dos cálculos dos consumos de água dos concretos com 50% de ART, de acordo com a descrição nos itens (a) até (g) do item 5.1.2.1.

Tabela 5-2-Cálculos dos consumos de água dos concretos com ART50

Traços	a/c _{inicial} , provável	C _{água} inicial (kg)	C _{água} total utilizado (kg)	C _F ¹ (kg)	Massa Seca (kg)	C _{100%} da Abs ART (kg)	C _{80%} da Abs ART (kg)	C _H ² (kg)	C _J ³ (kg)	a/c _{final} , provável ⁴
C-ART50 – Traço Rico → 1:1,25:1,125:0,73:0,4 → 35:43,75:39,375:25,55:14,0										
T _R 1 ^a	0,4	14,0	17,42	3,42	25,30	4,43	3,54	0,12	14,0	0,40
T _R 2 ^a	0,4	14,0	18,42	4,42	25,30	4,43	3,54	0,88	14,88	0,43
C-ART50 – Traço Normal → 1:1,95:1,46:0,94:0,545 → 30:58,5:43,80:28,20:16,35										
T _N 1 ^a	0,545	16,35	20,35	4,0	27,92	4,89	3,91	0,09	16,44	0,548
T _N 2 ^a	0,545	16,35	19,85	3,50	27,92	4,89	3,91	0,41	16,35	0,545
C-ART50 – Traço Pobre → 1:2,75:1,875:1,21:0,678 → 25:68,75:46,875:30,25:16,95										
T _P 1 ^a	0,678	16,95	22,45	5,50	29,95	5,24	4,19	1,31	18,26	0,73
T _P 2 ^a	0,678	16,95	21,95	5,0	29,95	5,24	4,19	0,81	17,76	0,71

Nota: sobrescrito 1: C_F = C_{água} total utilizado (kg) - C_{água} inicial (kg); sobrescrito 2: C_H = C_F (kg) - C_{80%} da Abs ART (kg); sobrescrito 3: C_J = C_{água} inicial (kg) + C_H (kg); sobrescrito 4: a/c_{final, provável} = C_J (kg) / consumo de cimento da mistura.

Na Tabela 5-3, apresentam-se todos os resultados obtidos dos cálculos dos itens 5.1.1 e 5.1.2, na preparação dos concretos com o agregado reciclado de telha, com substituição de 100% e 50%.

Já na Figura 5.2, elaborada com os dados da Tabela 5-3, visualizam-se os consumos de água excedentes em percentagem da Abs_{SSS} do ART. A absorção efetiva provável de 80% da absorção_{SSS} (adotada segundo a figura 4.10 e figura 4.11) está representada pela linha pontilhada 2.

A Tabela 5-3 representa as relações obtidas entre os consumos de água excedente e Abs_{SSS} do ART que resultou no consumo excedente em percentual (E). A divisão de E pela absorção $_{SSS}$ do ART (representada pela linha tracejada 1) teve como resultado o consumo de água em percentagem da absorção $_{SSS}$.

Tabela 5-3-Resultados obtidos na preparação dos traços de concretos com ART

Tipo de traço	Preparo Nº	C _{água inicial} provável ¹ (kg)	C _{água total} utilizada(kg)	Massa seca ART(kg)	E ² (%)	(E') ³ (%)	Slump (mm)
Série de concretos com substituição da B-1 por 100% de ART							
Rico	1ª prep.	14,0	21,50	50,24	14,93	85,30	75
1:1,25:1,45:0,40	2ª prep.		22,45		16,82	96,11	75
Normal	1ª prep	32,7	49,7	111,67	15,22	86,99	70
1:1,95:1,88:0,545							
Pobre	1ª prep	16,95	27,95	59,90	18,36	104,94	78
1:2,75:2,42:0,678	2ª prep.				18,36		82
Série de concretos com substituição da B-1 por 50% de ART							
Rico	1ª prep	14,0	17,42	25,30	13,52	77,24	78
1:1,25:1,125:0,73:0,40	2ª prep.		18,42		17,47	99,83	78
Normal	1ª prep	16,35	20,35	27,92	14,33	81,87	90
1:1,95:1,46:0,94:0,545	2ª prep.		19,85		12,54	71,63	78
Pobre	1ª prep	16,95	22,45	29,95	18,36	104,94	85
1:2,75:1,88:1,21:0,678	2ª prep.		21,95		16,69	95,40	90

¹ C_{água inicial provável}: é o consumo de água obtido para o traço ajustado com B-1, ou seja, não levando em consideração a absorção do agregado; caso os agregados B-1 e ART fossem exatamente iguais, esse seria o consumo de água do traço.

² E: é a massa de água excedente àquela da relação a/c, dividida pela massa seca do ART, em percentagem.

³E' = $E \div ABS_{SSS,ART}$: relação entre a água excedente e a absorção $_{SSS}$ do ART, em %.

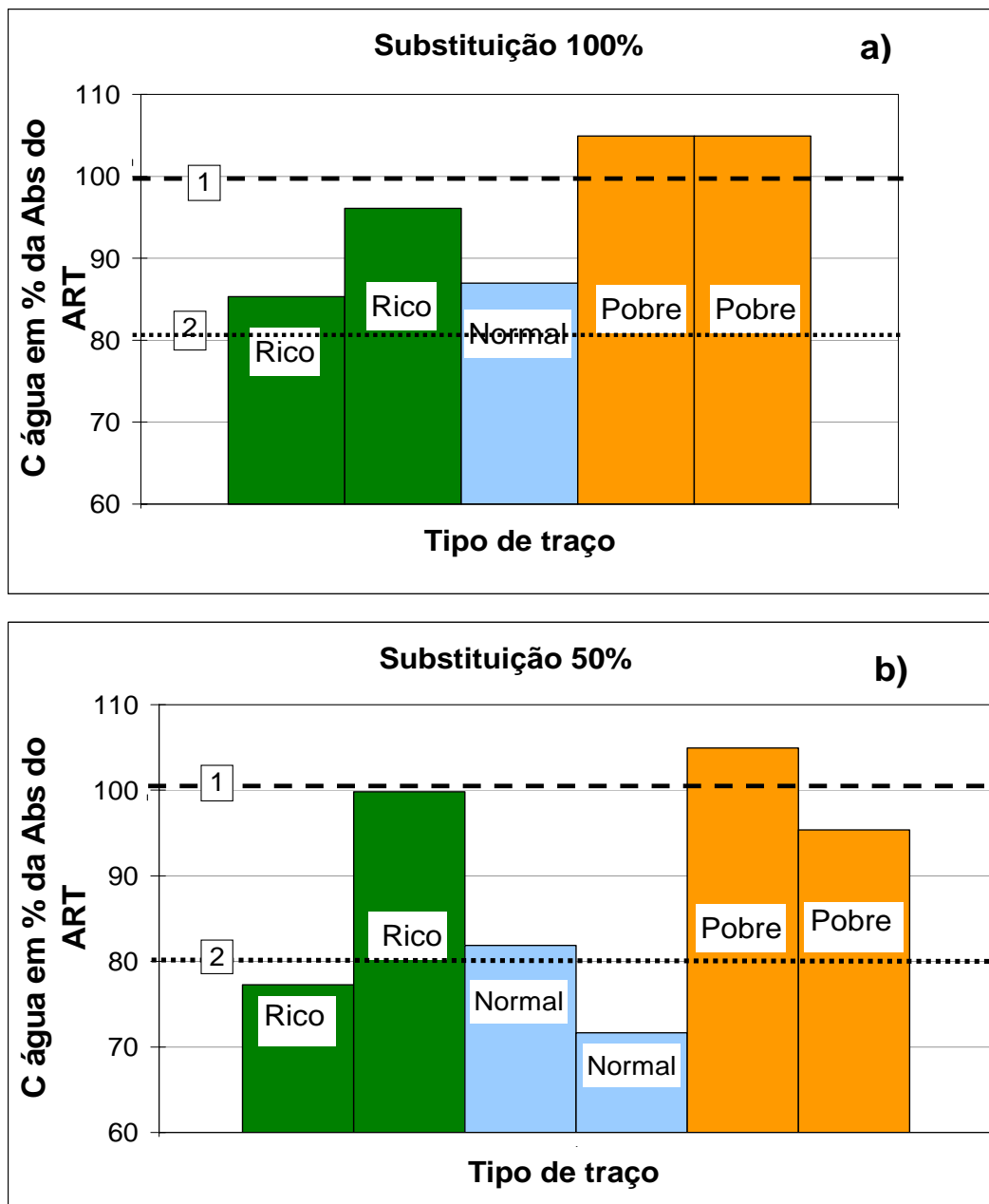


Figura 5.2 – Consumo de água excedente em porcentagem da absorção_{SSS} do ART: (a) para substituição de 100% da B-1 por ART; (b) para substituição de 50%

O índice médio do consumo excedente de água (aquele que supera a água da relação $a/C_{inicial,provável}$) que se relaciona com a absorção_{SSS} do agregado foi de 89,5% para substituição total da B-1 por ART. Quando a substituição foi de 50%, a referida média caiu para 82,6%. Isto explica que não foi somente a capacidade de absorção que interferiu no consumo excedente de água, ou seja, pode ter influenciado também a rugosidade da superfície e a superfície específica.

Dados da literatura consultada indicam que esses índices estão bem próximos dos resultados obtidos por Barra (1996), em ensaios com agregados reciclados de tijolos cerâmicos; os valores, denominados pela autora de absorção efetiva, foram de 88,6%, para a fração mais grossa e de 90,6%, para a fração mais fina.

Os resultados obtidos pelos traços tipo rico (1ª etapa) e normal (2ª etapa) mostram que o consumo de água excedente ficou próximo dos 80% do valor da absorção_{SSS} do ART para substituição de 50% do agregado natural pelo reciclado. Assim, obviamente, pode-se prever que o agregado absorveu esse excedente de água, isto é, devido à capacidade potencial de sucção demonstrada na Figura 4.10, mas para o caso em que, nos minutos iniciais da mistura dos materiais na betoneira, a água esteja disponível. Portanto, deduzindo-se, para esses traços não houve alteração significativa da relação $a/c_{\text{inicial, provável}}$.

Já para os traços restantes no traço rico, normal e pobre o consumo de água excedente ultrapassou os 80% do valor da absorção_{SSS} do ART para substituição de 50% e 100% do agregado natural pelo reciclado.

Nesse caso, fazendo-se uma análise para os traços pobres com substituição da B-1 por 100% de ART, foram encontrados os valores em: $C_{\text{água total utilizada}}$ foi de 27,95 kg; a quantidade de água provável (aquela que atenderia a relação $a/c_{\text{inicial, provável}}$) foi de 16,95 kg, resultando assim, o consumo excedente de água de 11,0 kg.

Admitindo-se que o ART poderia absorver, no máximo 90% de sua absorção_{SSS} em massa de água ($0,90 \times 17,5\% = 15,75\%$), o que mostra a sua capacidade de sucção durante o período do amassamento, ou seja, durante 10 a 15 minutos (conforme a Figura 4.10), ter-se-ia para o traço pobre: 9,43 kg ($15,75\% \times 59,9$ kg), e portanto a quantidade de água consumida (11,0 kg) excedeu à capacidade efetiva de absorção. Para esse intervalo de tempo, a velocidade de sucção de água mostrou ser muito baixa, próxima da nula para efeito do tempo de preparo de concreto, mesmo nas condições extremamente favoráveis investigadas (agregado imerso na água). Podem-se, portanto, supor que o agregado não absorveria mais água do que absorveu nesse tempo considerado. Concluindo-se, portanto, houve um excedente de água ($11,0 - 9,43$) de 1,57kg, que seriam incorporados à pasta, alterando a relação água/cimento. Nesse caso, a relação $a/c_{\text{final, provável}}$ seria de 0,74, ou seja, um aumento de 0,06 com relação à $a/c_{\text{inicial, provável}}$.

Da mesma maneira, fazendo-se a mesma análise para o outro traço, com 50% de ART, averiguou-se para 1º traço pobre, que a relação $a/c_{\text{final, provável}}$ seria de 0,71, portanto, houve um aumento de 0,03 em relação à $a/c_{\text{inicial, provável}}$.

5.1.3 Consumo de água dos traços adicionais

Foram produzidos 6 traços adicionais, conforme o item 4.3.3.2 (p. 71), num traço foi produzido concreto com B-1 e nos outros 5 traços, produzidos concretos com substituição da B-1 por 100% de ART. Todos executados no traço normal. Na Tabela 5-4, inferem-se os cálculos dos consumos de água que resultaram na execução dos concretos dos traços adicionais.

Tabela 5-4-Cálculos dos consumos de água dos traços adicionais dos concretos com ART100

Traços	$a/c_{\text{inicial, provável}}$	$C_{\text{água inicial}}$ (kg)	$C_{\text{água total}}$ utilizado (kg)	C_F^1 (kg)	Massa Seca (kg)	$C_{100\%}$ da Abs ART (kg)	$C_{80\%}$ da Abs ART (kg)	C_H^2 (kg)	C_J^3 (kg)	$a/c_{\text{final, provável}}^4$
C-ART100 – Traço Normal Seq. Invertida → 1:1,95:1,88:0,54 → 20:39:37,6:10,8 → T_C										
T _N 1 ^a	0,54	10,8	15,74	4,94	37,22	6,51	5,21	0,27	10,80	0,54
C-ART100 – Traço Normal Seq. Invertida → 1:1,95:1,88:0,54 → 20:39:37,6:10,8 → T_D										
T _N 1 ^a	0,54	10,8	16,15	5,35	37,22	6,51	5,21	0,14	10,94	0,547
C-ART100 – Traço Normal Seq. Invertida → 1:1,95:1,88:0,54 → 20:39:37,6:10,8 → T_E										
T _N 1 ^a	0,54	10,8	16,56	5,76	37,22	6,51	5,21	0,55	11,35	0,57
C-ART100 – Traço Normal Seq. Normal → 1:1,95:1,88:0,545 → 30:58,5:56,4:16,35 → T_F										
T _N 1 ^a	0,545	16,35	25,70	9,35	55,84	9,77	7,82	1,53	17,88	0,596
C-ART100 – Traço Normal Seq. Normal → 1:1,95:1,88:0,545 → 31,93:58,5:56,4:16,35 → T_G										
T _N 1 ^a	0,545	16,35	25,23	8,88	55,84	9,77	7,82	1,06	17,41	0,545

Nota: sobrescrito 1: $C_F = C_{\text{água total utilizado}} \text{ (kg)} - C_{\text{água inicial}} \text{ (kg)}$; sobrescrito 2: $C_H = C_F \text{ (kg)} - C_{80\% \text{ da Abs ART}} \text{ (kg)}$; sobrescrito 3: $C_J = C_{\text{água inicial}} \text{ (kg)} + C_H \text{ (kg)}$; sobrescrito 4: $a/c_{\text{final, provável}} = C_J \text{ (kg)} / \text{consumo de cimento da mistura}$.

Na Tabela 5-5, representam-se as relações obtidas entre os consumos de água excedente e Abs_{SSS} do ART que resultou no consumo excedente em percentual (E).

Tabela 5-5–Resultados obtidos na preparação dos traços adicionais de concretos com ART

Tipo de traço	Preparo Nº	C _{água inicial} provável ¹ (kg)	C _{água total} utilizada(kg)	Massa seca ART(kg)	E ² (%)	(E') ³ (%)	Slump (mm)
Série de concretos C-ART100 - Traços Normal – Seqüência invertida							
T _C :1:1,95:1,88:0,54	1ª prep.	10,8	15,74	37,22	13,27	75,83	80
T _D :1:1,95:1,88:0,54	1ª prep	10,8	16,15	37,22	14,37	82,11	76
T _E :1:1,95:1,88:0,54	1ª prep	10,8	16,56	37,22	15,48	88,46	95
Série de concretos C-ART100 - Traços Normal – Seqüência normal							
T _F :1:1,95:1,88:0,545	1ª prep	16,35	25,70	55,84	16,74	95,66	85
T _G :1:1,95:1,88:0,545	1ª prep	16,35	25,23	55,84	15,90	90,86	74

¹ C_{água inicial provável}: é o consumo de água obtido para o traço ajustado com B-1, ou seja, não leva em consideração a absorção do agregado; caso os agregados B-1 e ART fossem exatamente iguais, esse seria o consumo de água do traço.

² E: é a massa de água excedente àquela da relação a/c, dividida pela massa seca do ART, em porcentagem.

³E' = $E \div ABS_{SSS,ART}$: relação entre a água excedente e a absorção_{SSS} do ART, em %.

Comparando o consumo excedente de água, verificou-se que no caso dos traços adicionais, com emprego de aditivo plastificante, o consumo excedente não atingiu os 90% da absorção do ART, havendo então redução da relação $a/c_{final, provável}$, e isso pode ter influenciado na resistência.

Para os traços T_F e T_G houve diferença em média de 7% acrescida em relação ao índice de 87,24%, em que se notou que os consumos de água excedente ficaram próximos aos 90% do valor da absorção_{SSS} do ART.

5.1.4 Considerações gerais

Verificou-se que o agregado reciclado de telha dificilmente absorverá mais do que 90% da sua capacidade de absorção de água, em decorrência dos resultados dos ensaios realizados para a determinação da absorção de água por imersão.

No caso dos traços rico e normal, o índice máximo do consumo excedente de água (aquele que supera a água da relação $a/c_{\text{inicial,provável}}$) foi de 89,5% da absorção_{SSS} do agregado.

Para o caso dos traços pobres estudados, conclui-se que o consumo de água de amassamento, para atender a consistência estipulada, mostrou-se maior do que a quantidade inicial provável, aumentando portando, a relação $a/c_{\text{inicial,provável}}$.

Entretanto, ao se realizar o ensaio, colocando o agregado reciclado de telha com água na proporção dos 17,5% da absorção_{SSS} do agregado, dentro da betoneira em movimento, conforme Tabela 4-19 (p. 90), averiguou-se que o percentual do consumo de água caiu para 89% da absorção_{SSS}. Poder-se-á dizer que, quando da participação do cimento e da areia, junto com o ART, esses materiais concorrerão com o agregado graúdo no consumo de água, assim ocorrerá uma redução na taxa de absorção de água. Nesse caso, a indicação da NBR 15116 (ABNT, 2004) de pré-molhagem, com os 80% do teor de absorção do agregado reciclado parece adequada.

Os experimentos realizados indicaram que a absorção do agregado reciclado de telha é bem elevada e acima dos valores da absorção dos agregados reciclados de RCD, encontrados na literatura consultada. A sucção de água nos primeiros instantes é elevada, mas cai rapidamente. Há necessidade de pré-molhagem do ART, com o intuito de precaver a dificuldade encontrada para a obtenção de misturas mais homogêneas.

Sugere-se, para a determinação da capacidade de absorção dos agregados reciclados, o emprego do procedimento de secagem desenvolvida por Dias (2004b), pois apresenta boa reprodutibilidade e facilidade de execução para este tipo de agregado, inclusive quando contém frações finas. Na correlação do valor da Abs_{SSS} , com a capacidade de sucção do agregado com o tempo, é possível evidenciar a capacidade máxima de absorção de água que o agregado apresentará durante o período de amassamento do concreto.

5.2 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica no estado fresco depende da massa específica do agregado e da sua porosidade, bem como da sua textura, forma e tamanho (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Os resultados obtidos para as massas específicas no estado fresco, dos concretos com agregado natural (B-1) e com o agregado reciclado de telha (ART), estão apresentados na Figura 5.3. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR 9833 (ABNT, 1987).

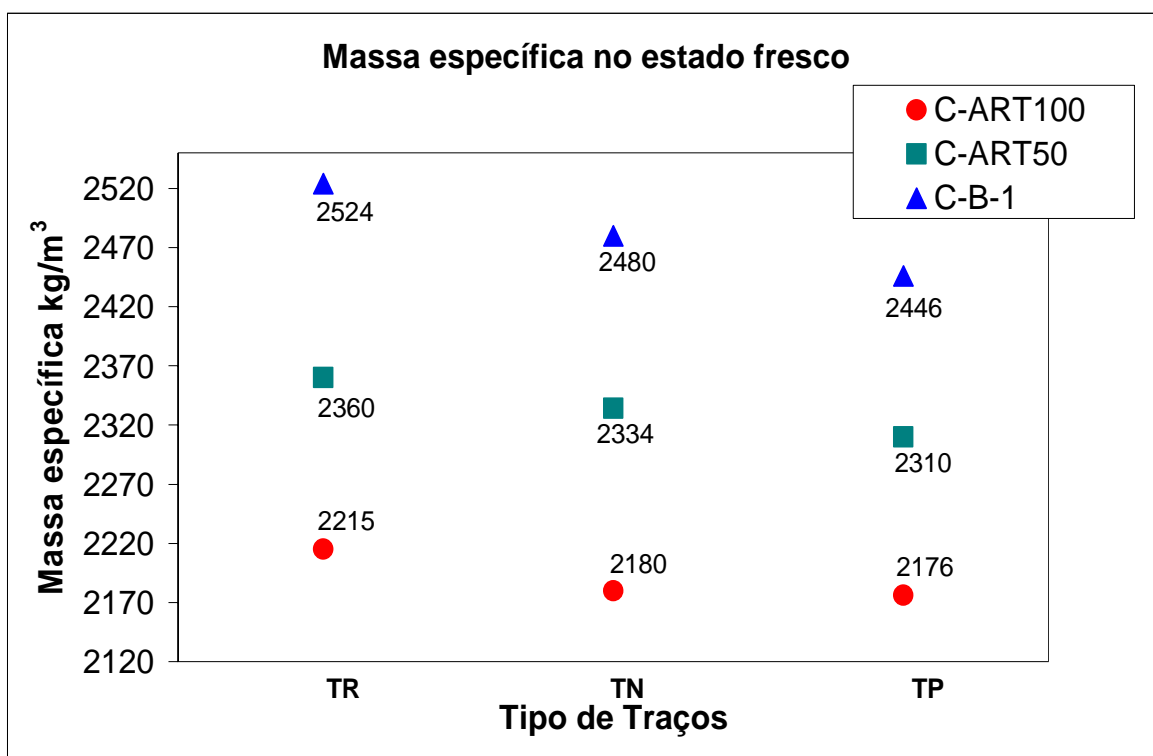


Figura 5.3 – Massa específica de diferentes séries de concretos no estado fresco

No gráfico da Figura 5.3, observa-se que há uma redução próxima de 12% da massa específica dos concretos com agregado reciclado com substituição de 100% (C-ART100), em relação aos concretos com agregado natural (C-B-1). Já para os concretos com substituição de 50% (C-ART50) houve uma diminuição de 6%.

Os pesquisadores Cachim et. al. (2006) mostraram, em seus experimentos, que a menor densidade dos agregados reciclados de tijolos cerâmicos acarretou uma redução nos valores da massa específica do concreto fresco. A redução foi de aproximadamente 5% para os concretos com relação água/cimento de 0,45 e 6% para os concretos com relação água/cimento 0,5. Leite (2001) também acusou em suas pesquisas com agregados

reciclados que, realmente, há uma redução da massa específica do concreto no estado fresco.

A massa específica dos concretos normais, com agregados derivados de rochas graníticas, gnáissicas, basálticas e calcárias densas possui massa específica variando entre 2200 a 2500 kg/m³. E para os concretos pesados, como agregados do tipo barita, limalhas de ferro, etc., a densidade pode ser 3200 a 3500 kg/m³.

Já para concretos com agregados leves, como argila expandida, vermiculita, a massa específica varia entre 300 a 1800 kg/m³.

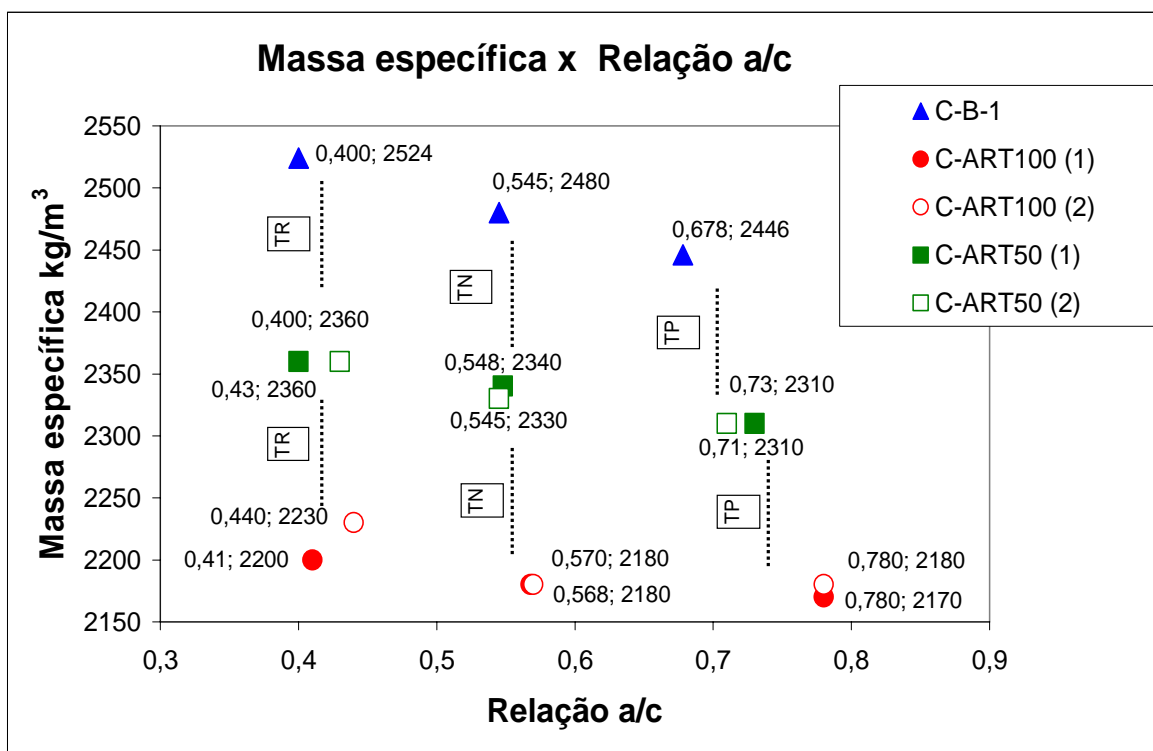


Figura 5.4 – Massa específica no estado fresco das diferentes séries de concreto estudadas

Podem-se ainda observar, no gráfico da Figura 5.4, os efeitos da relação água/cimento sobre a massa específica, em que se visualizam a diminuição da massa específica do concreto com o aumento da relação água/cimento, tendência também observada por Cachim et. al. (2006)

Como mostra o gráfico da Figura 5.5, a massa específica no estado fresco para os traços adicionais também diminuíram em relação aos concretos com agregados naturais.

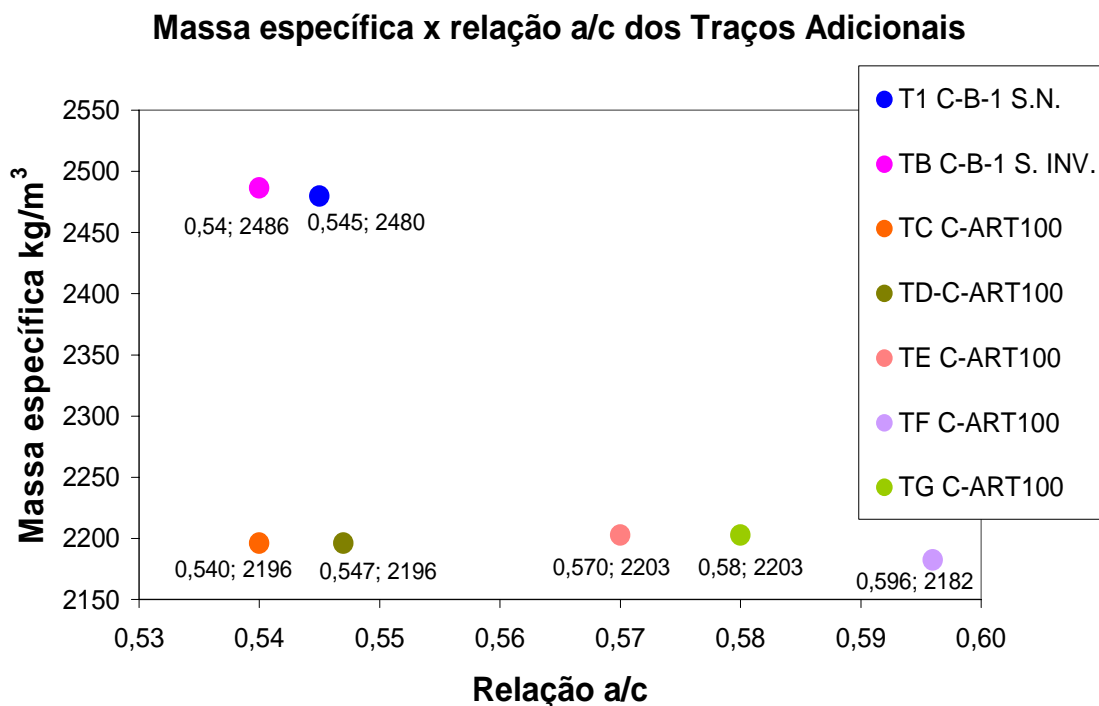


Figura 5.5 – Massa específica de diferentes séries de concretos no estado fresco

Com relação às massas específicas, verifica-se que, em média, os concretos com 100% de substituição da B-1 pelo ART apresentaram uma queda de 2196 kg/m³ no valor as massas específicas no estado fresco.

5.2.1 Considerações gerais

Portanto, a substituição da B-1 por ART provoca uma diminuição da massa específica no estado fresco do concreto.

Além disso, quanto maior o teor de substituição do agregado reciclado, menor foi a massa específica no estado fresco.

Verificou-se que, ao aumentar a relação a/c, conseqüentemente o consumo de água livre no concreto, houve uma redução na massa específica no estado fresco.

5.3 TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade foi avaliada através da medida da consistência no ensaio de abatimento do troco de cone, conforme a NBR NM 67 (ANBT, 1998). Os concretos foram preparados tendo-se como objetivo atingir o abatimento de 80 ± 20 mm. Os concretos também foram avaliados visualmente quanto ao seu aspecto, ou seja, se estavam bem argamassados, se houve exsudação e, apenas o concreto C-ART100, no traço pobre, apresentou uma pequena exsudação, conforme se ilustra a Figura 5.6 (a), (b), (c), mostrando assim, o aspecto dos concretos C-ART100, no momento da realização do ensaio de abatimento do tronco de cone.



Figura 5.6 a) Concreto C-ART100 – Traço Rico



b) Concreto C-ART100 – Traço Normal



c) Concreto C-ART100 – Traço Pobre

Os concretos C-ART50 mostram-se bem argamassados, mas no traço normal ocorreu uma pequena exsudação, conforme ilustração na Figura 5.7 (a), (b) e (c).



Figura 5.7 a) Concreto C-ART50 Traço rico



b) Concreto C-ART50 Traço normal



c) Concreto C-ART50 Traço pobre

Da mesma forma, retratam-se os traços adicionais dos concretos C-ART100 no traço normal, na Figura 5.8 (a), (b), (c), mostrando o aspecto bem argamassado dos concretos.



Figura 5.8 a) Concreto
C-ART100 Traço normal- T_C

b) Concreto C-ART100
Traço normal - T_D

c) Concreto C-ART100
Traço normal - T_F

A Tabela 5-6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de determinação do abatimento do tronco de cone.

Tabela 5-6–Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone

Traços	Concretos	Amn (%)	Agn (%)	ART (%)	Abatimento (mm)	
T_R	C-B-1	100	100	-	90	
T_N	C-B-1	100	100	-	85	
T_P	C-B-1	100	100	-	78	
T_R	C-ART100	100	-	100	75	75
T_N	C-ART100	100	-	100	70	80
T_P	C-ART100	100	-	100	78	82
T_R	C-ART50	100	50	50	78	78
T_N	C-ART50	100	50	50	90	78
T_P	C-ART50	100	50	50	85	90
T_B	C-B-1	100	100	-	85	
T_C	C-ART100	100	-	100	80	
T_D	C-ART100	100	-	100	76	
T_E	C-ART100	100	-	100	95	
T_F	C-ART100	100	-	100	85	
T_G	C-ART100	100	-	100	74	

Obs: Os concretos C-ART100 e C-ART50 foram produzidos em duas etapas, por isso apresentam-se com dois resultados.

O abatimento foi fixado em 80 ± 20 mm, e percebe-se no gráfico da Figura 5.9, que há uma variação dentro da faixa de 60 a 100 mm para os concretos com agregado reciclado, inclusive para os concretos de mesmo traço (etapa 1 \times etapa 2).

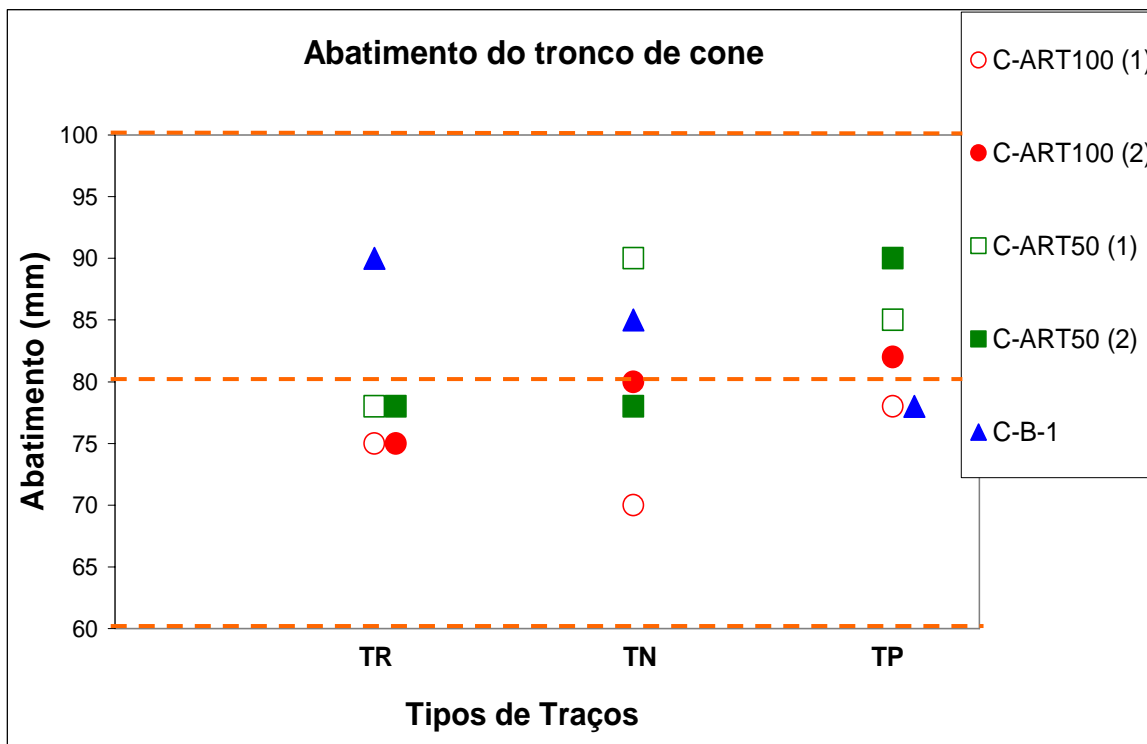


Figura 5.9 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone dos concretos

Neville (1997) reconheceu que as misturas ricas têm abatimento satisfatório e são perceptíveis as variações de trabalhabilidade. Entretanto, para as misturas pobres ou ásperas, tendem ao abatimento por cisalhamento, ou ao desmoronamento, podendo se obter resultados muito diferentes, para diferentes amostras da mesma mistura. Portanto, o autor afirmou que o concreto com agregado reciclado apresenta maior aspereza, e registra índices de abatimento mais baixos e mais variáveis que o concreto com agregado natural. O autor salienta que quanto menor e mais anguloso for o agregado, maior será o teor de água necessário para alcançar o abatimento desejado.

Apresentam-se na Figura 5.10, os resultados do ensaio do abatimento de tronco de cone dos traços adicionais.

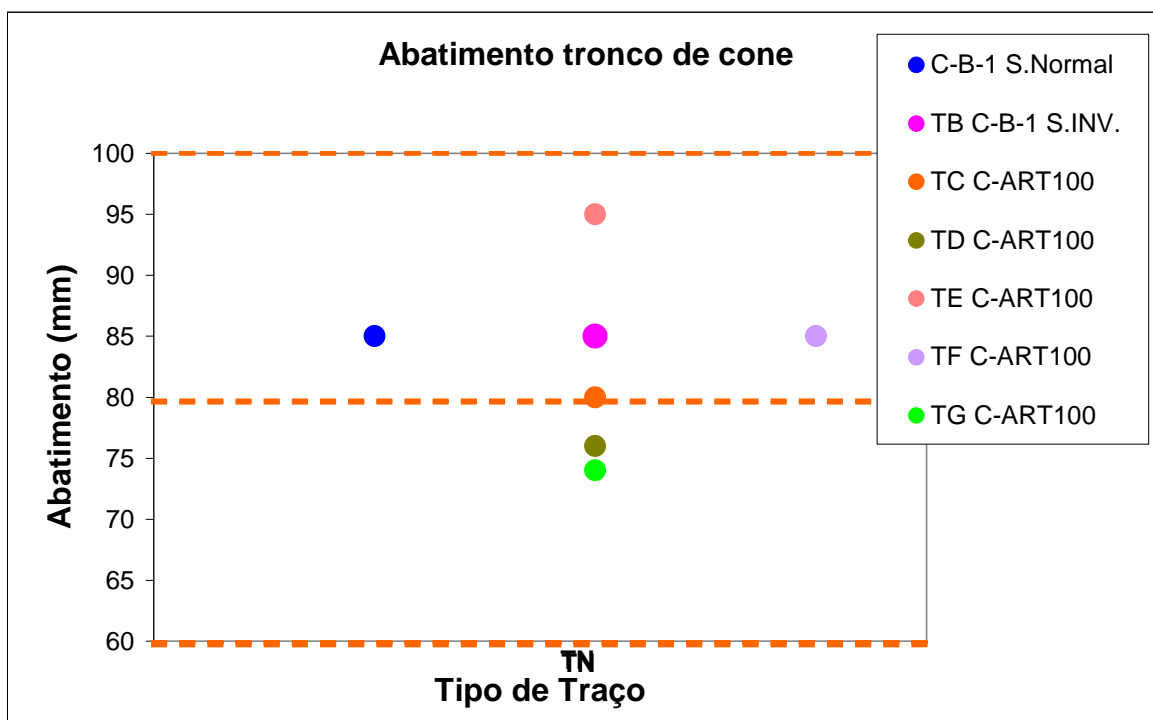


Figura 5.10 – Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone dos traços adicionais

Do mesmo modo, para traços adicionais confeccionados, o ensaio de consistência medida pelo abatimento resultou também em certa variabilidade, mas dentro da faixa estipulada de 80 ± 20 mm. O que de certo modo, os traços adicionais apresentaram abatimentos com índices abaixo dos concretos de referência, exceto para o concreto C-ART100 no traço T_E com variação um pouco acima. Atingindo-se assim, todos os traços adicionais a consistência plástica adotada.

Como se pode observar, a trabalhabilidade reúne um conjunto de características que tornam um concreto idôneo e de fácil colocação nos elementos a serem concretados, como os fatores intrínsecos, o atrito interno, coesão, viscosidade, homogeneidade, traço adequado para preenchimento dos vazios, etc. e, os fatores extrínsecos podendo-se ser: dimensões da peça a concretar, relação volume/superfície do elemento, quantidade e disposição de armaduras, equipamentos de transporte, lançamento, adensamento, etc.

Já a consistência é um dos principais fatores da trabalhabilidade, não devendo, no entanto, ser confundida com ela. E pode ser entendida como o grau de plasticidade da mistura, ou seja, sua maior ou menor facilidade de deformação sob ação de cargas.

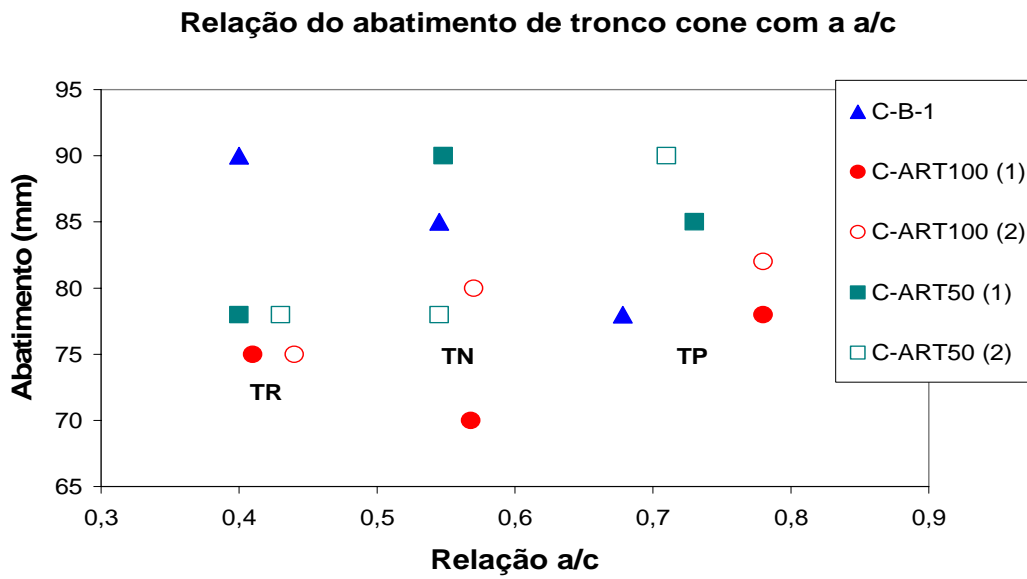


Figura 5.11 – Abatimento dos concretos e a sua relação a/c_{provável}

Confrontando-se a medida da consistência dos concretos em relação com a água/cimento _{provável} verifica-se no gráfico da Figura 5.11, que os concretos com agregados naturais C-B-1 (T_R, T_N, T_P) tiveram uma regressão do abatimento em relação água/cimento. Já para os concretos com agregados reciclados C-ART50 e C-ART100 obtiveram uma ascensão do abatimento em relação água/cimento. Isto significa, para o concreto reciclado C-ART50 e C-ART100, que quanto maior o acréscimo de ART, maior será a quantidade de água provável gasta e menor tende a ser o abatimento do concreto.

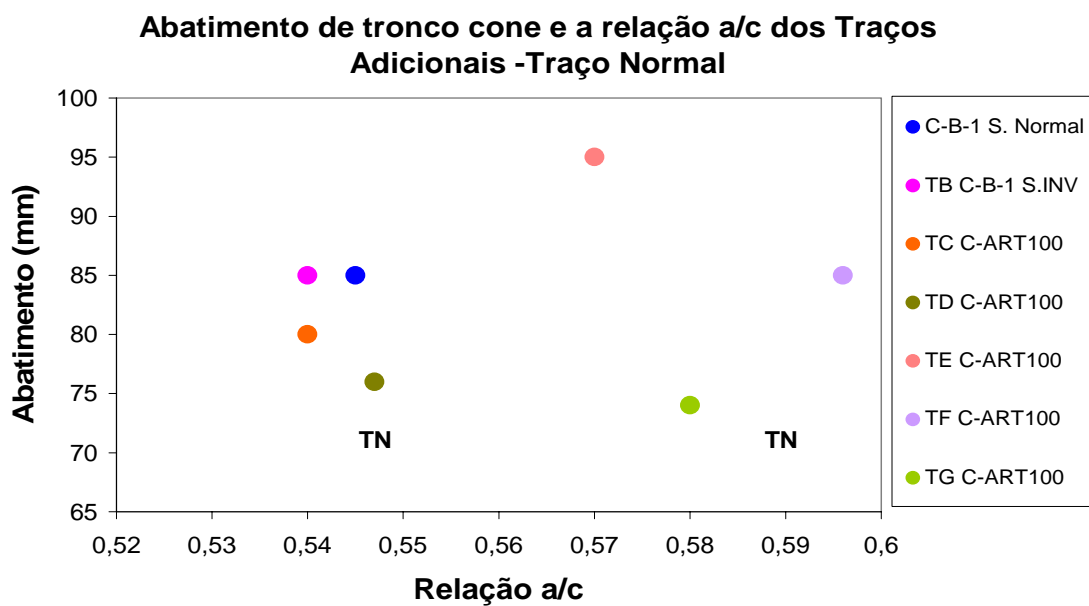


Figura 5.12 – Abatimento dos concretos e a relação a/c traços adicionais

Além disso, observando-se o gráfico na Figura 5.12 apresenta-se os traços adicionais um menor abatimento quando comparados com os concretos com B-1 na seqüência normal e invertida, mas com exceção T_E. No traço T_F houve aumento na relação $a/c_{\text{provável}}$, mas manteve o abatimento em relação ao concreto C-B-1 na S. Normal. Já para o traço T_G houve aumento na relação $a/c_{\text{provável}}$ e abaixamento no abatimento quando comparado com o concreto C-B-1 na Seqüência Normal.

5.3.1 Considerações gerais

A granulometria mais contínua, a forma mais irregular e a textura mais áspera dos agregados graúdos reciclados contribuíram para que os concretos com agregados reciclados apresentassem menores valores de abatimento, devido ao maior travamento e empacotamento existente entre as partículas de agregado graúdo nas misturas de concreto com agregado reciclado, quando comparado ao concreto com agregados naturais.

No gráfico da Figura 5.13, visualiza-se com mais amplitude o abatimento do tronco de cone em relação à água/cimento.

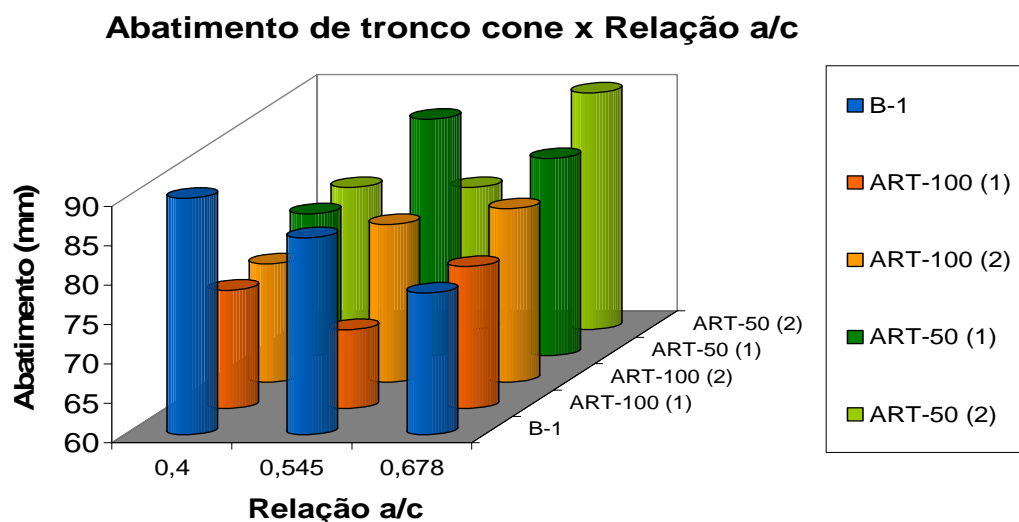


Figura 5.13 – Abatimentos dos concretos e a relação $a/c_{\text{provável}}$ dos concretos

Concluindo, a variabilidade encontrada nos valores dos abatimentos é possível de ser esperada quando se utiliza o agregado reciclado graúdo de telha.

CAPÍTULO 6

ESTADO ENDURECIDO - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão do concreto é definida como a capacidade do material de suportar ações aplicadas, sem entrar em ruptura e é uma das propriedades de grande interesse para a engenharia de estruturas, e as demais propriedades geralmente são correlacionadas com ela.

Neste trabalho, a resistência à compressão dos concretos foi avaliada utilizando corpos-de-prova cilíndricos $\Phi 15 \times 30$ cm e $\Phi 10 \times 20$ cm, conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 1994). Os corpos-de-prova, depois de curados, foram capeados com enxofre, para serem submetidos ao ensaio de resistência à compressão, nas idades estabelecidas de 7 e 28 dias.

O carregamento dos corpos-de-prova foi efetuado com o emprego de uma máquina universal de ensaios, modelo DL 60000, marca Emic, com escala calibrada de 600 KN-compressão. Esta máquina⁷ de ensaio permite o controle da velocidade de aplicação de carga, o que facilitou os trabalhos e permitiu eliminar esta variável na análise dos resultados. A Figura 6.1 mostra a máquina utilizada nos ensaios de rompimento dos corpos-de-prova.

⁷ Resolução de carga: para a escala de 20% com resolução relativa de 0,08%; para a escala de 40% com resolução relativa 0,04%; para a escala de 60% com resolução relativa de 0,03%; para a escala de 80% com resolução relativa de 0,02% e a escala de 93,33 com resolução de 0,02%.



Figura 6.1 – Máquina (modelo DL Emic) utilizada nos ensaios para o rompimento dos corpos-de-prova

Apresentam-se na Tabela 6-1 os resultados obtidos dos rompimentos dos corpos-de-prova no ensaio de resistência à compressão axial, nas idades de 7 e 28 dias. Foram moldados e ensaiados 2 corpos-de-prova para cada traço e idade, mas somente o maior resultado foi considerado.

Tabela 6-1–Resistência à compressão e massa específica aparente

Traço (final ajustado)	Relação a/c	Teor de cimento (C)	Resistência à compressão (fc)	Massa esp. aparente ¹
	a/c	(kg/m ³)	(MPa)	(kg/m ³)
Concretos C-B-1				
T _R -1:1,25:2,25	0,4	486,35	27,81(7 dias)	2420
			37,91(28 dias)	2480
T _N -1:1,95:2,92	0,545	367,45	18,49 (7)	2430
			28,28 (28)	2450
T _P -1:2,75:3,75	0,678	287,90	13,12 (7)	2420
			19,15 (28)	2440
Concretos C-ART100				
T _R -1:1,25:1,45	0,41	485,15	15,08 (7)	2160
			21,89 (28)	2110
T _N -1:1,95:1,88	0,568	364,58	11,11 (7)	2130
			16,47 (28)	2040
T _P -1:2,75:2,42	0,78	279,44	7,41 (7)	2090
			11,08 (28)	2000
Concretos C-ART50				
T _R - 1:1,25:1,125:0,73	0,40	487,56	20,24 (7)	2320
			30,04 (28)	2290
T _N - 1:1,95:1,46:0,94	0,545	367,73	16,31 (7)	2290
			25,84 (28)	2250
T _P - 1:2,75:1,875:1,21	0,73	283,56	10,62 (7)	2290
			18,52 (28)	2240

Nota: sobrescrito 1 → se refere à massa específica aparente em como se apresenta o corpo-de-prova curado.

Na Tabela 6-2, apresenta-se a relação entre as resistências aos 7 e 28 dias dos concretos de referência e dos concretos com ART, a partir dos dados da Tabela 6-1.

Tabela 6-2–Relação entre as resistências: $f_{c,7} \div f_{c,28}$

concretos	Traço Rico	Traço Normal	Traço Pobre
C-B-1	73%	65%	69%
C-ART100	69%	67%	67%
C-ART50	67%	63%	57%

A partir dos dados da Tabela 6-2, observa-se que a relação entre as resistências aos 7 e 28 dias, dos concretos com ART, não sofreu alteração significativa quando comparada com o concreto de referência com B-1.

Bicca (2000), em sua pesquisa, ensaiou concretos com agregados de rejeito cerâmico de placas de revestimento de pisos, tijolos e blocos, obtendo o percentual de 53% para a relação entre as médias das resistências aos 7 dias e 28 dias; como se observa, é um valor bem mais baixo do que os mencionados na Tabela 6-2, entretanto o autor utilizou cimento CPIV Classe 32 e os agregados são outros.

Leite (2001) observou em seus experimentos, que cerca de 87% da resistência aos 28 dias é alcançada aos 7 dias. Afirma que isso é devido a uma tendência à rápida evolução na hidratação do concreto com agregado reciclado, que deve ser resultado da taxa de absorção mais alta do agregado, que diminui a quantidade de água da mistura, fazendo com que os cristais de etringita e de hidróxido de cálcio formados cresçam menos, tornando a pasta mais densa. A autora relata que o grau de hidratação do concreto representa, junto com a relação a/c, os fatores determinantes da resistência à compressão de concretos. O aumento da idade de hidratação do concreto também implica a diminuição da sua porosidade.

Apresentam-se os resultados relativos entre as resistências dos concretos C-ART100 e C-ART50 em relação aos concretos C-B-1 no gráfico da Figura 6.2.

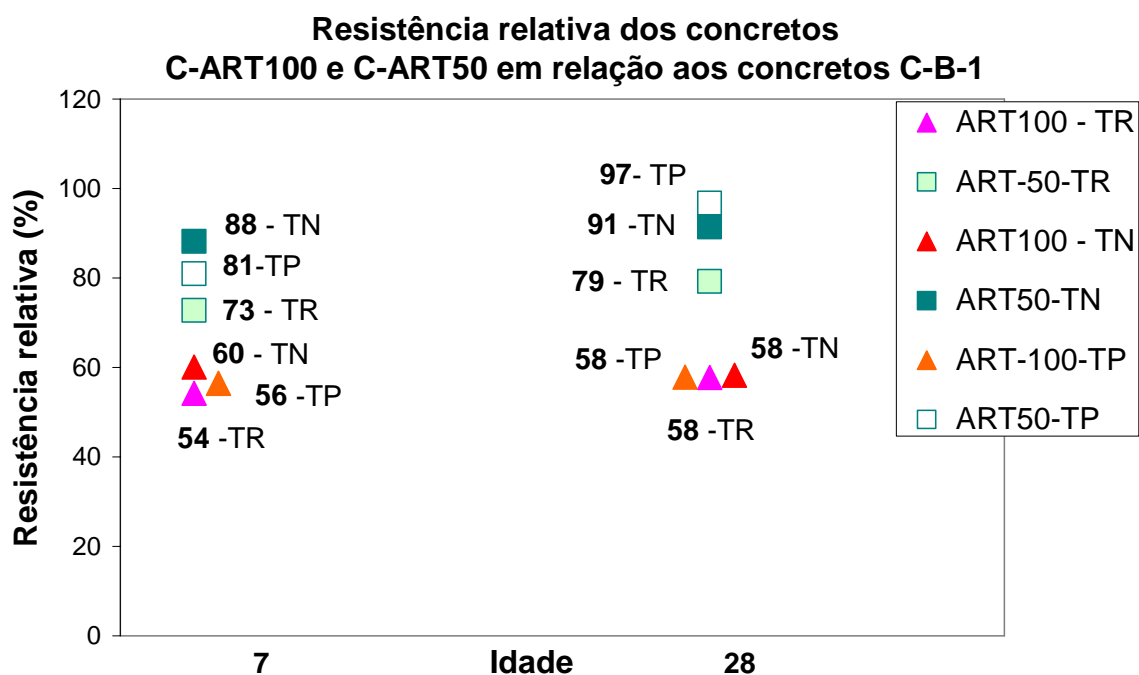


Figura 6.2 – Resistência relativa dos concretos C-ART100 e C-ART50 em relação aos concretos C-B-1, nas idades aos 7 e 28 dias

Analisando os resultados da Tabela 6-1 e da Figura 6.2, verifica-se que, para o concreto com substituição de 100% ART atingir a resistência do concreto de referência com B-1, seria necessário um aumento substancial do consumo de cimento. Os dados mostram que a resistência do concreto C-B-1 no traço Pobre (19,15 MPa – 28 dias) somente foi alcançada pelo concreto C-ART100 no traço Rico (21,89 MPa-28 dias).

Pela análise comparativa das resistências relativas dos concretos com ART e os concretos de referência, observou-se que, aos 7 dias, os concretos C-ART100 apresentaram queda de 40 a 46%, já os C-ART50 apresentaram queda de 12 a 27%, portanto bem inferiores. Analisando aos 28 dias, a queda foi aproximadamente de 42% para todos os concretos C-ART100 e do mesmo modo bem inferiores para os concretos C-ART50, girando de 3 a 21%. Supõe-se então, que deve haver um percentual de substituição, no qual a resistência do concreto com substituição parcial seja aproximadamente a mesma do concreto com agregado natural. A queda comparativa entre as idades de 7 e 28 dias parece não ser significativa, apesar de que aos 28 dias os percentuais de queda estão um pouco abaixo dos observados para 7 dias.

Na seqüência, com os resultados das resistências, equiparou-se o diagrama de dosagem do concreto de referência com o diagrama de dosagem dos concretos C- ART100 e C-ART50.

6.1.1 Diagrama de dosagem C-B-1

Com os resultados das resistências à compressão construiu-se o diagrama de dosagem, de acordo com Helene e Terzian (1992). Para a montagem do diagrama foram determinadas quatro correlações (leis de comportamento) para os concretos C-B-1: as correlações 6.1 e 6.2 que são equações originárias da “Lei de Abrams”, a correlação 6.3 originária da “Lei de Lyse” e a correlação 6.4 originária da “Lei de Molinari”, sendo que todas elas foram determinadas segundo o método dos mínimos quadrados. Estas equações estão relacionadas com a resistência à compressão, a relação a/c, a relação agregados secos/cimento em massa (m) e o consumo de cimento do traço do concreto.

$$f_{c7} = \frac{76,74}{13,34^{a/c}} \quad 6.1$$

Onde: “Lei de Abrams”

f_{c7} = resistência à compressão axial, à idade aos 7 dias, em MPa

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$f_{c28} = \frac{89,13}{8,91^{a/c}} \quad 6.2$$

Onde: “Lei de Abrams”

f_{c28} = resistência à compressão axial, à idade aos 28 dias, em MPa

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$m = 10,78 + 0,875 * a/c \quad 6.3$$

Onde: “Lei de Lyse”

m = relação de agregados secos/cimento em massa, em kg/kg

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$C = 1000 / (0,472 + 0,41 * m) \tag{6.4}$$

onde: “ Lei de Molinari”

C = consumo de cimento por m³ de concreto adensado, em kg/m³

m = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg

Na Figura 6.3, ilustra-se o diagrama de dosagem dos concretos com agregados naturais (C-B-1). Como se pode observar no primeiro quadrante, as duas curvas (f_{c7} e f_{c28}) apresentam uma tendência de comportamento esperada, da relação a/c com a resistência, ou seja, a relação a/c é inversamente proporcional à resistência à compressão. As duas curvas têm a mesma tendência de evolução de crescimento das resistências com a idade para as diferentes relações a/c.

Já no terceiro e quarto quadrantes da Figura 6.3, correlacionam-se o consumo de cimento com a relação em massa seca agregado/cimento e a relação a/c com a relação em massa seca agregado/cimento.

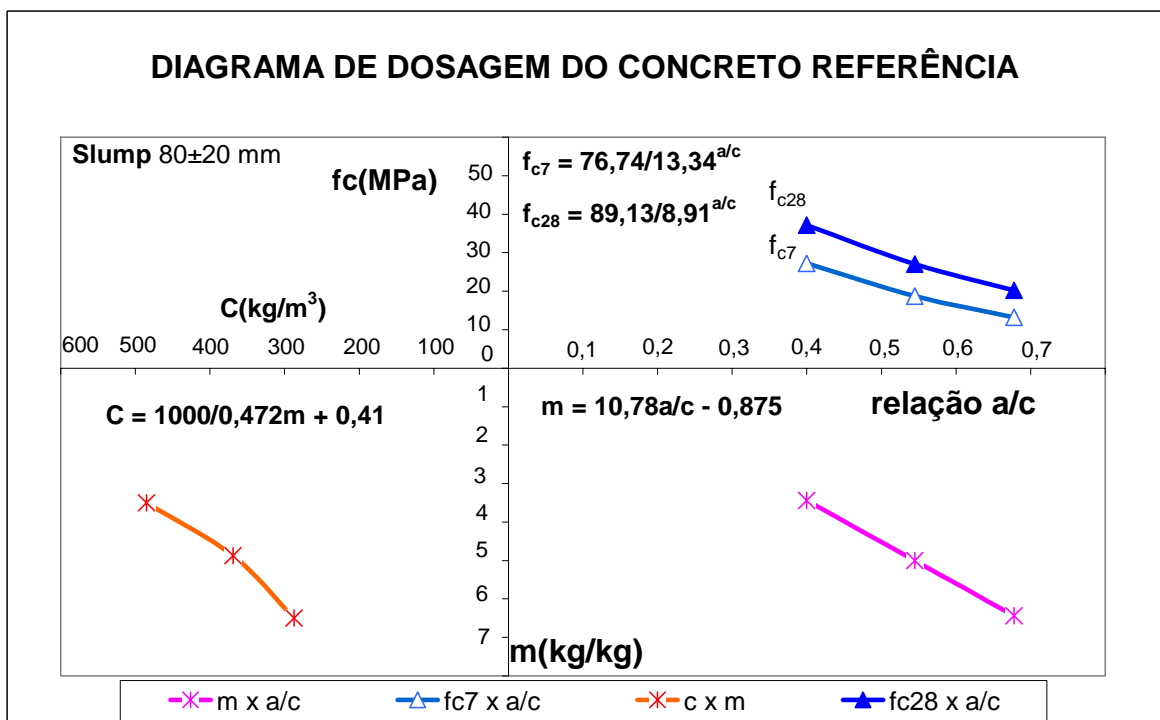


Figura 6.3 – Diagrama de dosagem da propriedade resistência à compressão do C-B-1

6.1.2 Diagrama de dosagem C-ART100

Apresentam-se a seguir, as quatro correlações das leis de comportamento para a montagem do diagrama de dosagem dos concretos C-ART100.

$$f_{c7} = \frac{42,66}{10^{a/c}} \quad 6.5$$

Onde: “Lei de Abrams”

f_{c7} = resistência à compressão axial, à idade aos 7 dias, em MPa

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$f_{c28} = \frac{63,10}{10^{a/c}} \quad 6.6$$

Onde: “Lei de Abrams”

f_{c28} = resistência à compressão axial, à idade aos 28 dias, em MPa

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$m = 8,48 + 1,16 * a/c \quad 6.7$$

Onde: “Lei de Lyse ”

m = relação de agregados secos/cimento em massa, em kg/kg

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$C = 1000 / (0,61 + 0,45 * m) \quad 6.8$$

onde: “Lei de Molinari”

C = consumo de cimento por m^3 de concreto adensado em kg/m^3

m = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg

6.1.3 Diagrama de dosagem C-ART50

Apresentam-se a seguir as quatro correlações das leis de comportamento para a montagem do diagrama de dosagem dos concretos C-ART50.

$$f_{c7} = \frac{51,29}{8,51^{a/c}} \quad 6.9$$

Onde: “Lei de Abrams”

f_{c7} = resistência à compressão axial, à idade aos 7 dias, em MPa

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$f_{c28} = \frac{58,88}{4,68^{a/c}} \quad 6.10$$

Onde: “Lei de Abrams”

f_{c28} = resistência à compressão axial, à idade aos 28 dias, em MPa

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$m = 9 + 0,697 * a/c \quad 6.11$$

Onde: “Lei de Lyse”

m = relação de agregados secos/cimento em massa, em kg/kg

a/c = relação água cimento em massa, em kg/kg

$$C = 1000 / (0,53 + 0,43 * m) \quad 6.12$$

onde: “Lei de Molinari”

C = consumo de cimento por m^3 de concreto adensado, em kg/m^3

m = relação em massa seca de agregados/cimento, em kg/kg

Como se sabe, a resistência é inversamente proporcional à relação água/cimento, e a resistência está intimamente relacionada com a porosidade dos materiais. Assim, quanto mais porosos estes se apresentam, menor tende ser a resistência.

Geralmente, com o uso de agregados densos e resistentes, como o agregado natural, observa-se que esta propriedade é influenciada, basicamente, pela porosidade da matriz e da zona de transição.

Já para concretos com agregados reciclados, observa-se que, além da porosidade da matriz de cimento e da zona de transição, existe também a porosidade do próprio agregado. No caso de aumento da relação a/c, ocorre um enfraquecimento progressivo da matriz de cimento, devido ao aumento da porosidade, o que concorre com a diminuição da resistência. Acredita-se que a porosidade do agregado passe a ter um papel importante na determinação da resistência do concreto (Mehta; Monteiro, 1994).

Na Figura 6.4 ilustra-se a fratura do corpo de prova rompido no ensaio de resistência à compressão, no traço normal do concreto C-ART100, aos 28 dias. Verifica-se que há ruptura dos grãos do agregado reciclado.

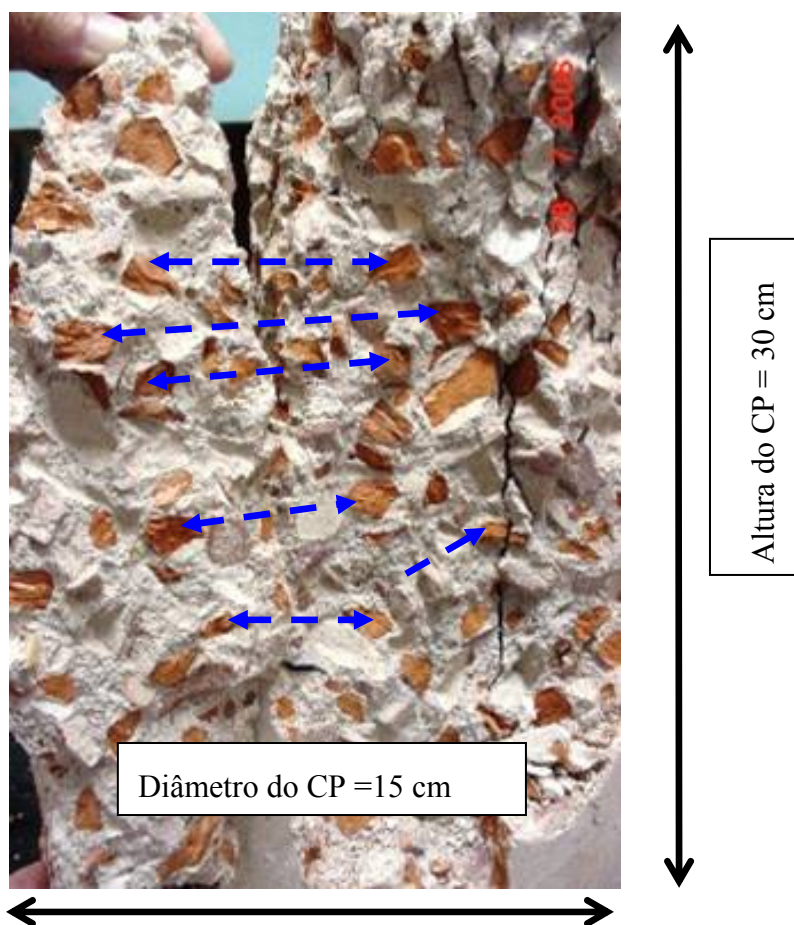


Figura 6.4 – Corpo-de-prova rompido do concreto C-ART100, no traço normal, aos 28 dias

Como se observa na Figura 6.4, houve ruptura dos grãos do agregado (ART), o que não aconteceu quando o agregado foi o basáltico (B-1). O corpo-de-prova aqui ilustrado rompeu com uma carga próxima a 23.000 kgf, resultando em uma resistência de 13 MPa.

De fato, não se conhece a resistência à compressão do material utilizado, mas para este nível de tensão, em princípio, pode ser considerado alto, pois para os blocos cerâmicos estruturais a resistência característica à compressão é especificada a partir de 3 MPa, expressa na área bruta, segundo a NBR 15270-2 (ABNT, 2005), portanto resultando em valor bem mais baixo do que o obtido. Deve-se ressaltar que esta não é uma referência adequada, pois a geometria do bloco também pode interferir na sua resistência à compressão, portanto, esta analogia deve ser vista com reservas.

Apresentam-se, na Figura 6.5, o diagrama de dosagem dos concretos de referência e os concretos com ART, aos 7 dias.

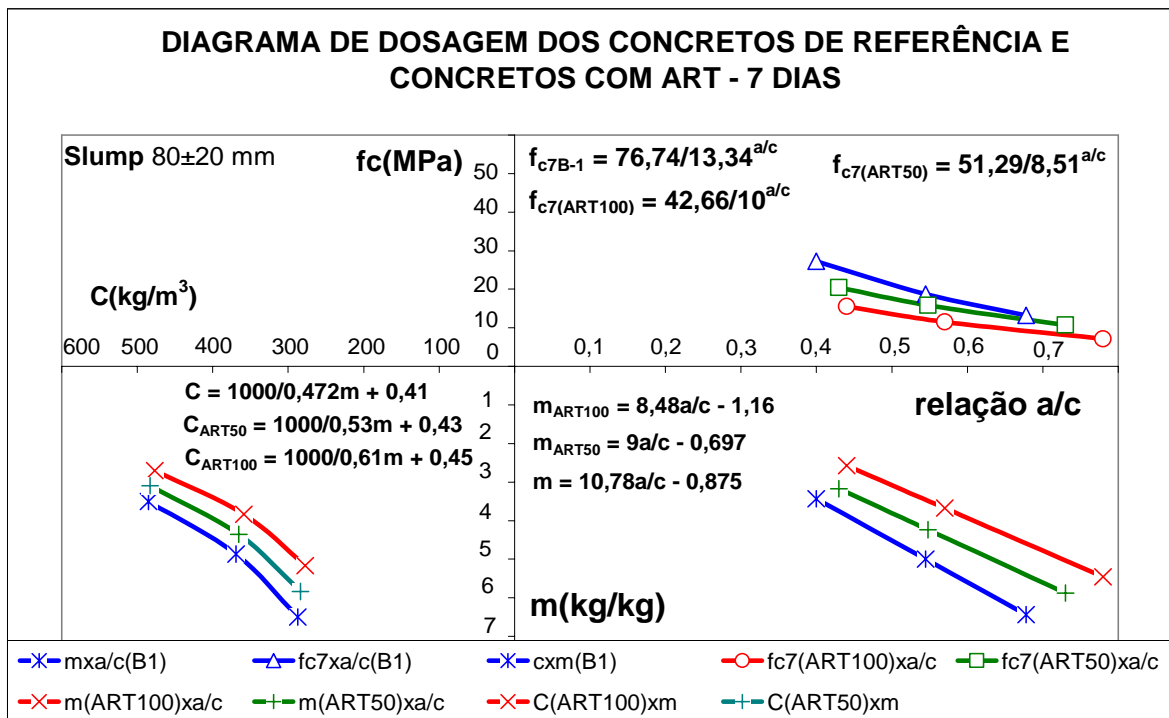


Figura 6.5 – Diagrama de dosagem da propriedade de resistência à compressão dos concretos de referência e concretos com ART, aos 7 dias

O diagrama obtido pode ser considerado um modelo de comportamento para os concretos estudados, dessa forma, fazendo-se um paralelismo entre os diagramas dos concretos de referência com os concretos com ART, conforme se ilustra na Figura 6.5. No tocante à resistência à compressão aos 7 dias, pode-se dizer:

- 1) com substituição total da B-1 por ART, para uma relação a/c = 0,44, pode-se esperar uma queda na resistência à compressão de 37%, aos 7 dias. Já com a substituição de 50% a queda seria de 18%, bem mais baixa.
- 2) com substituição total da B-1 por ART, para uma relação a/c = 0,57, pode-se esperar uma queda na resistência à compressão de 34%, aos 7 dias. Já com a substituição de 50% a queda seria de 14%, também mais baixa.

3) com substituição total da B-1 por ART, para uma relação $a/c = 0,78$, pode-se esperar uma queda na resistência à compressão de 30%, aos 7 dias. Já com a substituição de 50% a queda seria de 5%, muito mais baixa.

Com estes dados, verifica-se que, à medida que o traço foi empobrecido a resistência dos concretos com substituição parcial convergiu para os valores do concreto de referência.

Apresenta-se, na Figura 6.6, o diagrama de dosagem dos concretos de referência e concretos com ART, aos 28 dias.

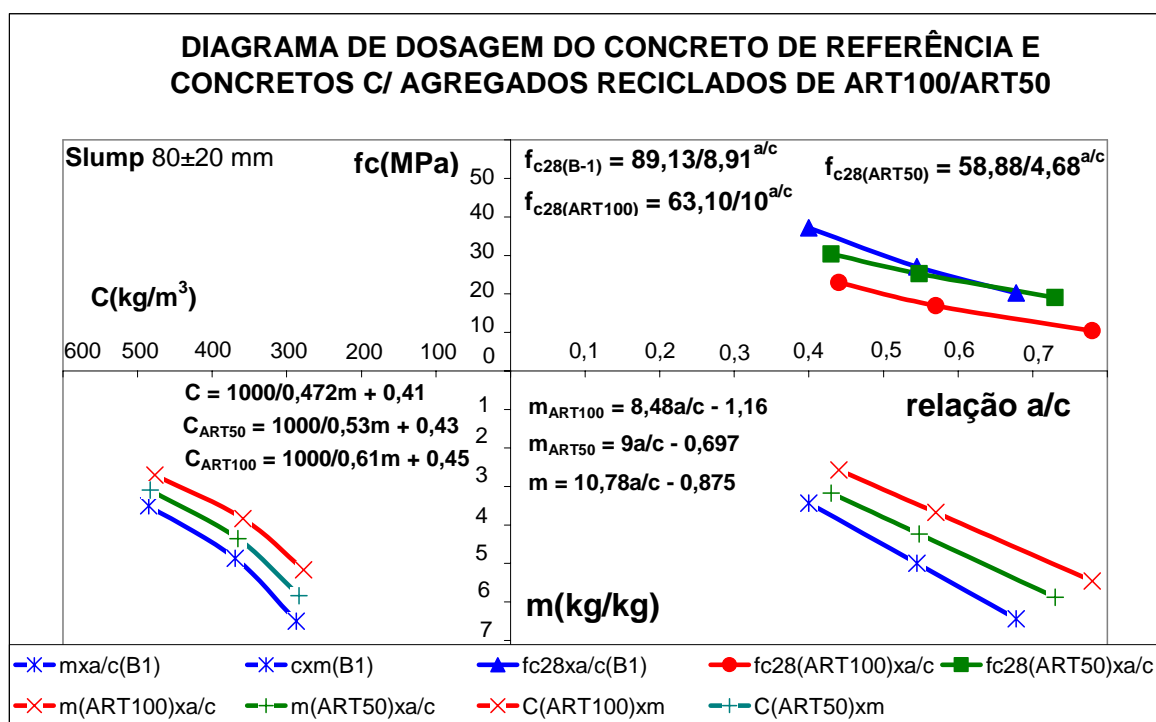


Figura 6.6 – Diagrama de dosagem da propriedade de resistência à compressão dos concretos de referência e concretos com ART, aos 28 dias

Como na análise anterior, fazendo-se um paralelismo entre os diagramas dos concretos de referência com os concretos com ART, conforme se ilustra na Figura 6.8 no tocante à resistência à compressão, aos 28 dias, pode-se dizer:

- 1) as resistências dos concretos com substituição total da brita pelo ART são sempre inferiores às dos concretos com o agregado natural (B-1).
- 2) com aumento da relação $a/c_{efetiva}$, a menor resistência do agregado reciclado de telha (cujo valor não foi investigado, mas certamente é mais baixo do que da B-1) e a menor

resistência pasta-agregado (que também não foi investigada), deve ter contribuído para a queda sistemática da resistência em relação aos concretos de referência.

3) com substituição total da B-1 por ART, para uma relação $a/c = 0,44$, pode-se esperar uma queda na resistência à compressão de 33%, aos 28 dias, ou seja, uma queda muito próxima daquela prevista para 7 dias, denotando que a evolução das resistências dos concretos de referência e daqueles com agregado reciclado transcorreu de forma semelhante. Já com a substituição de 50%, a queda esperada seria de 12%, muito mais baixa, portanto.

4) com substituição total da B-1 por ART, para uma relação $a/c = 0,57$, pode-se esperar uma queda na resistência à compressão de 34%, aos 28 dias. Já com a substituição de 50%, a queda seria de 5%, muito mais baixa e próxima da resistência do concreto de referência.

5) com substituição total da B-1 por ART, para uma relação $a/c = 0,78$, pode-se esperar uma queda na resistência à compressão de 35%, aos 28 dias. Já com a substituição de 50% a queda seria de 9%, também muito mais baixa.

6) Concluindo-se, deve haver um percentual de substituição da brita natural pelo agregado reciclado de telha, com o qual a resistência à compressão do concreto obtido seja aproximadamente a mesma do concreto com agregado natural.

Hansen (1992) afirma que, ao empregar agregados reciclados, as resistências dos concretos variaram entre 60% e 100% em relação ao concreto com agregados naturais. Encontrou em várias pesquisas valores de resistência à compressão de concretos com agregados graúdos reciclados, variando entre 5 a 20% mais baixos que os valores de resistência dos concretos de referência. Já pesquisas no Japão mostram que houve uma taxa de redução das resistências de concretos com agregados reciclados oscilando entre 14 e 32%.

6.1.4 Diagrama e avaliação das resistências segundo o modelo de Powers (1960)

Para outra avaliação dos concretos com agregados reciclados recorreu-se à teoria de Powers (1960), com o objetivo de se fazer uma analogia das resistências obtidas experimentalmente com as resistências calculadas pelo seu modelo (de acordo com os graus de hidratação do cimento). De acordo com o modelo concebido por Powers (1960), a resistência do concreto poderia ser prevista mediante a análise da composição química do cimento.

Ressalta-se que não é objetivo deste trabalho fazer um estudo pormenorizado da teoria de Powers, mas identificar possíveis correlações que possam sugerir trabalhos futuros. Além disso, pretendeu-se identificar a interferência no comportamento do concreto quando se substitui o agregado natural pelo reciclado.

Apresenta-se, então, a criação dos modelos representativos da composição física do concreto fresco e endurecido e se avaliam as resistências dos concretos de acordo com Powers (1960).

Empiricamente, determinam-se as resistências segundo o modelo de Powers (1960) pela fórmula:

6.13

$$f_c = f_c^0 x^n$$

Onde:

f_c = resistência à compressão, em MPa

f_c^0 = resistência potencial do gel, para $\alpha_{100\%}$, equivalendo 120 MPa

x = relação volume de gel / volume da pasta

x_F = relação volume de gel/ volume da pasta com ar

n = constante empírica, depende do material ($n = 2$ e $n = 3$)

Os diagramas de Powers serão esquematizados para os 9 traços dos concretos de referência e dos concretos com ART.

6.1.4.1 Diagrama e avaliação das resistências segundo o modelo de Powers (1960) dos concretos C-B-1

As reações que transformam o cimento Portland em agente ligante ocorrem na pasta de cimento e água. A presença de água, os silicatos e aluminatos formam produtos de hidratação que, com o tempo, formam a pasta, firme e dura, a pasta de cimento endurecida (NEVILLE, 1997).

A evolução da hidratação do cimento determina-se através da quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na pasta, calor desenvolvido na hidratação, massa específica da pasta, quantidade de água combinada quimicamente e quantidade de cimento não-hidratado presente (NEVILLE, 1997).

Apresenta-se aqui o modelo representativo da composição física do concreto fresco e endurecido para os concretos de referência, de acordo com o modelo proposto por Powers (1960). Os modelos são constituídos de 2 diagramas: um para o grau de hidratação de 100% e o outro para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias. De acordo com os experimentos de Powers, o cimento que ele utilizou atingiu 67% do grau de hidratação aos 28 dias, sendo que o grau de hidratação, aos 28 dias, depende do tipo de cimento.

Demonstram-se aqui, os cálculos da composição na estrutura interna do concreto, segundo o modelo de Powers (1960).

1) Estrutura interna do concreto

a) Determinação da água quimicamente combinada (água de cristalização).

A Tabela 6-3 se refere à determinação da água quimicamente combinada, ou seja, água de cristalização. Ao calcular a água de cristalização, precisa-se definir para cada componente do cimento, a sua participação no cimento. Essa participação foi fornecida pelo laboratório de análises do fabricante do cimento Cauê (o cimento utilizado nos experimentos foi o CP II E 32). A quantidade de água para hidratar cada um dos componentes do cimento foi estabelecida por Powers.

Tabela 6-3–Resultados da água de cristalização para o cimento CP II E 32 (Cauê)

Componentes	Participação no cimento	Água de hidratação	hc
C ₃ S	34,2%	24%	0,0821
C ₂ S	8,55%	21%	0,0180
C ₃ A	4,62%	40%	0,0185
C ₄ AF	4,79%	47%	0,0225
			Σ = 0,1411

Obs: hc → água de cristalização

b) Determinação do volume de cimento:

$$V_c = 1 / \gamma_{\text{cimento}} = 1/3,0 = 0,3333 \text{ dm}^3$$

c) Volume de sólidos

$$V_{\text{sólidos}} = hc + V_c = 0,1411 + 0,3333 = 0,4744 \text{ dm}^3$$

d) Determinação do vazão interlamelar => Volume ocupado pela água (gel)

Na pasta tem uma porosidade característica de cerca de 28%.

$$\% \text{ poros} = V_{hg} / (V_{\text{sólidos}} + V_{hg}) \rightarrow 0,28 = V_{hg} / (0,4744 + V_{hg}) \rightarrow V_{hg} = 0,1844 \text{ dm}^3$$

(Volume da água adsorvida pelo gel)

$$V_h = hc + V_{hg} = 0,1411 + 0,1844 = 0,3255 \text{ dm}^3 \text{ (Volume de água necessária para a hidratação)}$$

e) Volume dos produtos sólidos de hidratação – V_{pt}

e₁) V_{pt} (sem contração)

$$V_{pt} = V_c + V_{hg} = 0,3333 + 0,1844 = 0,5177 \text{ dm}^3$$

e₂) V_{pt} (com contração)

Os produtos sólidos da hidratação ocupam um volume igual à soma dos volumes do cimento anidro e água, menos 0,254 do volume da água não-evaporável, ou seja, contração de 25,4%.

$$V_{pt} = V_c + V_{hg} (1-0,254) = 0,3333 + 0,1844 (1-0,254) = 0,4709 \text{ dm}^3$$

e₃) Volume de ar aprisionado

$$V_{ar \text{ aprisionado}} = \% \text{ contração} \times V_{hg} = 0,254 \times 0,1844 = 0,0468$$

$$V_{contração} = \% \text{ contração} \times V_{hc} = 0,254 \times 0,1411 = 0,0358 \text{ dm}^3$$

2) Diagrama de Powers para C-B-1 $\alpha_H = 100\%$ -Traço Normal - 1: 1,95 : 2,92 : 0,545

Apresenta-se, na Tabela 6-4, o diagrama de Powers para o concreto C-B-1 no T. Normal, no grau de hidratação de 100%, aos 28 dias.

$$\gamma_a = 2,60 \text{ kg/dm}^3 \quad \gamma_{B-1} = 2,81 \text{ kg/dm}^3$$

Tabela 6-4–Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TN), $\alpha_H = 100\%$, aos 28 dias

Concreto fresco -TN		Concreto hidratado - TN	
%	Volume	Volume	%
1,73	Ar aprisionado	Vazios	3,21
20,11	Água	Água capilar $V_{hcp}=0,2195$	8,1
	$V_h = 0,545 (a/c)$	Água gel $V_{hg}=0,1844$	6,8
12,30	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Sólidos hidratados $V_{pt}=0,4709$	17,38
27,68	Areia $V_a = 0,75$	Areia $V_a = 0,75$	27,68
38,34	Pedra (B1) $V_p = 1,039$	Pedra (B1) $V_p = 1,039$	38,34

2.1) Cálculos dos constituintes do concreto para compor o diagrama de Powers (no grau de hidratação de 100%), segundo o modelo da Tabela 6-4.

a) Volume da areia e B-1 $\rightarrow V_a = 1,95/2,60 = 0,75 \text{ dm}^3$ $V_{B-1} = 2,92/2,81 = 1,039 \text{ dm}^3$

b) Volume do concreto $\rightarrow V_c = 1/3 + 1,95/2,6 + 2,92/2,81 + 0,545 = 2,664 + 0,0468 = 2,71 \text{ dm}^3$

c) % da participação dos constituintes

% B-1 = $1,039/2,71 = 38,34\%$ (V_{B-1}); % areia = $0,75/2,71 = 27,68\%$ (V_a); % cimento = $0,3333/2,71 = 12,3\%$ (V_c); % água = $0,545/2,71 = 20,11\%$ ($V_{\text{água}}$); % ar = $0,0468/2,71 = 1,73\%$ (V_{ar})

d) água capilar (hcp): a relação água/cimento (a/c) = 0,545 de água.

- 0,1411 hc (água de cristalização)
- 0,1844 hg (água gel)
- 0,2195 hcp ($0,545 - 0,1411 - 0,1844$)

e) % de participação: % vazios \rightarrow contração = $0,04/2,71 = 1,48\%$; ar aprisionado = $0,047/2,71 = 1,73\%$ \rightarrow Total % vazios = $1,48 + 1,73 = 3,21\%$.

% $V_{pt} = 0,4709/2,71 = 17,38\%$ - Volume de sólidos da pasta totalmente hidratados

% $V_{hg} = 0,1844/2,71 = 6,8\%$ - Volume de água de gel

% $V_{hcp} = 0,2195/2,71 = 8,1\%$ - Volume de água capilar

Volume de material com resistência = $38,34 + 27,68 + 17,38 + 6,8 = 90,2\%$

f) Cálculo das resistências para o Traço Normal do C-B-1 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

f₁) Volume de gel = $0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$

$$f_2) \text{ Volume da pasta} = 0,3333 + 0,545 = 0,8733 \text{ dm}^3$$

f₃) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,623/0,8733)^2 = 60,38 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,623/0,8733)^3 = 42,83 \text{ MPa}$$

3) Diagrama de Powers para C-B-1 $\alpha_H = 67\%$ -Traço Normal - 1: 1,95 : 2,92 : 0,545

Apresenta-se, na Tabela 6-5, o diagrama de Powers para o concreto C-B-1 no Traço Normal, para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias.

Tabela 6-5–Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TN). $\alpha_H = 67\%$, aos 28 dias

Concreto fresco - TN		Concreto hidratado-TN	
%	Volume	Volume	%
1,73	Ar aprisionado	Vazio $V = 0,071$	2,61
20,11	Água $V_h = 0,545 \text{ (a/c)}$	Água capilar $V_{hcp} = 0,3270$	12,07
12,30	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1235$	4,56
		Sólidos hid $V_{pt} = 0,3155$	11,64
		Cimento/anidro $V = 0,109989$	4,06
27,68	Areia $V_a = 0,75$	Areia $V_a = 0,75$	27,68
38,34	Pedra (B1) $V_p = 1,039$	Pedra (B1) $V_p = 1,039$	38,34

3.1) Cálculos dos constituintes do concreto para compor o diagrama de Powers (para o grau de hidratação de 67%), segundo o modelo da Tabela 6-5.

a) água capilar e adsorvida (hcp): 0,545 de água

- $0,1411 \text{ hc} \times 0,67 = 0,09454$ (água de cristalização)
- $0,1844 \text{ hg} \times 0,67 = 0,1235$ (água gel)
- $0,3270 \text{ hcp} (0,545 - 0,09454 - 0,1235)$

b) % de participação: %vazios \rightarrow contração = $[0,254 \cdot (0,67 \cdot 0,1411)] / 2,71 = 0,88\%$; ar aprisionado = $0,0468 / 2,71 = 1,73\%$ \rightarrow Total % vazios = $2,61\%$

$$\% V_{pt} = (0,4709 \cdot 0,67) / 2,71 = 11,64\%$$

$$\% V_{hg} = (0,1844 \cdot 0,67) / 2,71 = 4,56\%$$

$$\% V_{hcp} = 0,3270 / 2,71 = 12,07\%$$

$$\% \text{cimento anidro} = [0,3333 \cdot (100\% - 67\%)] / 2,71 = 4,06\%$$

c) Cálculo das resistências para o Traço Normal do C-B-1 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

$$c_1) \text{Volume de gel} = (0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \cdot 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$$

$$c_2) \text{Volume da pasta} = 0,67 \cdot 0,3333 + 0,545 = 0,7683 \text{ dm}^3$$

c₃) Aplicando a fórmula

$$\text{Para o } n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,7683)^2 = 35,42 \text{ MPa}$$

$$\text{Para o } n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,7683)^3 = 19,24 \text{ MPa}$$

4) Diagrama de Powers para C-B-1 - $\alpha_H = 100\%$ - Traço Rico – 1: 1,25 : 2,25 : 0,40

Apresenta-se, na Tabela 6-6, o diagrama de Powers para o concreto C-B-1 no Traço Rico, para o grau de hidratação de 100%, aos 28 dias.

Tabela 6-6–Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TR), $\alpha_H = 100\%$, aos 28 dias

Concreto fresco -TR		Concreto hidratado - TR	
%	Volume	Volume	%
2,27	Ar aprisionado	Vazios	4,01
19,42	Água $V_h = 0,40$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,0745$	3,62
		Água gel $V_{hg} = 0,1844$	8,95
16,18	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Sólidos hidratados $V_{pt} = 0,4709$	22,86
23,35	Areia $V_a = 0,481$	Areia $V_a = 0,481$	23,35
	Pedra (B1) $V_p = 0,801$	Pedra (B1) $V_p = 0,801$	

4.1) Cálculo das resistências para o Traço Rico do C-B-1 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

a) Volume de gel = $0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,3333 + 0,4 = 0,7333 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 0,7333)^2 = 86,62 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 0,7333)^3 = 73,59 \text{ MPa}$$

5) Diagrama de Powers para C-B-1 - $\alpha_H = 67\%$ - Traço Rico – 1: 1,25 : 2,25 : 0,40

Apresenta-se, na Tabela 6-7, o diagrama de Powers para o concreto C-B-1 no Traço Rico, para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias.

Tabela 6-7–Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TR), $\alpha_H = 67\%$, aos 28 dias

Concreto fresco - TR		Concreto hidratado-TR	
%	Volume	Volume	%
2,27	Ar aprisionado	Vazios V = 0,071	3,44
19,42	Água Vh = 0,40 (a/c)	Água capilar Vh _{cp} =0,1820	8,83
16,18	Cimento anidro V _c = 0,3333	Água gel Vh _g =0,1235	6,0
23,35	Areia V _a = 0,481	Sólidos hid V _{pt} =0,3155	15,32
38,88	Pedra (B1) V _p = 0,801	Cimento/anidro V = 0,109989	5,34
		Areia V _a = 0,481	23,35
		Pedra (B1) V _p = 0,801	38,88

5.1) Cálculo das resistências para o Traço Rico do C-B-1 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

$$\text{Volume de gel} = (0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \times 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volume da pasta} = 0,67 \times 0,3333 + 0,4 = 0,6233 \text{ dm}^3$$

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,6233)^2 = 53,81 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,6233)^3 = 36,04 \text{ MPa}$$

6) Diagrama de Powers para C-B-1 $\alpha_H = 100\%$ -Traço Pobre – 1 : 2,75 : 3,75 : 0,678

Apresenta-se, na Tabela 6-8, o diagrama de Powers para o concreto C-B-1 no Traço Pobre, para o grau de hidratação de 100%, aos 28 dias.

Tabela 6-8–Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TP), $\alpha_H = 100\%$, aos 28 dias

Concreto fresco -TP		Concreto hidratado - TP	
%	Volume	Volume	%
1,36	Ar aprisionado	Vazios	2,44
19,65	Água $V_h = 0,678$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,3525$	10,22
		Água gel $V_{hg} = 0,1844$	5,34
9,67	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Sólidos hidratados $V_{pt} = 0,4709$	13,65
30,66	Areia $V_a = 1,058$	Areia $V_a = 1,058$	30,66
38,68	Pedra (B1) $V_p = 1,3345$	Pedra (B1) $V_p = 1,3345$	38,68

6.1) Cálculo das resistências para o Traço Pobre do C-B-1 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

a) Volume de gel = $0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,3333 + 0,678 = 1,0113 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 1,0113)^2 = 45,54 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 1,0113)^3 = 28,05 \text{ MPa}$$

7) Diagrama de Powers para C-B-1 $\alpha_H = 67\%$ -Traço Pobre – 1 : 2,75 : 3,75 : 0,678

Apresenta-se, na Tabela 6-9, o diagrama de Powers para o concreto C-B-1 no Traço Pobre, para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias.

Tabela 6-9–Diagrama de Powers para o concreto C-B-1 (TR), $\alpha_H = 67\%$, aos 28 dias

Concreto fresco - TP		Concreto hidratado-TP	
%	Volume	Volume	%
1,36	Ar aprisionado	Vazios $V = 0,071$	2,1
19,65	Água $V_h = 0,678$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,46$	13,33
9,67	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1235$	3,58
30,66	Areia $V_a = 1,0577$	Sólidos hid $V_{pt} = 0,3155$	9,15
38,68	Pedra (B1) $V_p = 1,3345$	Cimento/anidro $V = 0,109989$	3,2
		Areia $V_a = 1,0577$	30,66
		Pedra (B1) $V_p = 1,3345$	38,68

7.1) Cálculo das resistências para o Traço Pobre do C-B-1 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

a) Volume de gel = $(0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \times 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,67 \times 0,3333 + 0,678 = 0,9013 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,9013)^2 = 25,73 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,9013)^3 = 11,92 \text{ MPa}$$

6.1.4.2 Diagrama e avaliação das resistências segundo o modelo de Powers (1960) do concreto C-ART100

Apresenta-se aqui o modelo representativo da composição física do concreto fresco e endurecido para os concretos C-ART100, de acordo com o modelo proposto por Powers

(1960). Os modelos são constituídos de 2 diagramas: um para o grau de hidratação de 100% e o outro para o grau de hidratação de 67%, na idade aos 28 dias.

1) Diagrama de Powers do C-ART100 $\alpha_H = 100\%$ – Traço Normal $\rightarrow 1 : 1,95 : 1,88 : 0,57$

Apresenta-se, na Tabela 6-10, o diagrama de Powers do concreto C-ART100 no Traço Normal, para o grau de hidratação de 100%, aos 28 dias.

Tabela 6-10–Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TN) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias

Concreto fresco -TN		Concreto hidratado - TN	
%	Volume	Volume	%
1,71	Ar aprisionado	Vazios	3,02
20,8	Água $V_h = 0,57$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,2445$	8,92
		Água gel $V_{hg} = 0,1844$	6,73
12,16	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Sólidos hidratados $V_{pt} = 0,4709$	17,19
27,37	Areia $V_a = 0,75$	Areia $V_a = 0,75$	27,37
37,96	Pedra (ART100) $V_p = 1,040$	Pedra (ART100) $V_p = 1,040$	37,96

1.1) Cálculo das resistências para o Traço Normal do C-ART100 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

a) Vol. de gel = $V_c + 0,746 V_{hc} + V_{hg} = 0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$

b) Vol. da pasta = $V_c + a/c = 0,3333 + 0,57 = 0,9033 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$P/n = 2 \rightarrow f_c = 120 \times (0,623/0,9033)^2 = 57,08 \text{ MPa}$

$P/n = 3 \rightarrow f_c = 120 \times (0,623/0,9033)^3 = 39,37 \text{ MPa}$

2) Diagrama de Powers do C-ART100 $\alpha_H = 67\%$ – Traço Normal $\rightarrow 1 : 1,95 : 1,88 : 0,57$

Apresenta-se, na Tabela 6-11, o diagrama de Powers do concreto C-ART100 no Traço Normal, para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias.

Tabela 6-11–Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TN) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias

Concreto fresco - TN		Concreto hidratado-TN	
%	Volume	Volume	%
1,71	Ar aprisionado	Vazios $V=0,071$	2,59
20,8	Água $V_h = 0,57$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp}=0,3520$	12,85
12,16	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg}=0,1235$	4,51
27,37	Areia $V_a = 0,75$	Sólidos hid $V_{pt}=0,3155$	11,51
37,96	Pedra (ART100) $V_p = 1,040$	Cimento anidro $V = 0,109989$	4,0
		Areia $V_a = 0,75$	27,37
		Pedra (ART100) $V_p = 1,040$	37,96

2.2) Cálculo das resistências para o Traço Normal do C-ART100 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

a) Vol. de gel = $V_c + 0,746 V_{hc} + V_{hg} = (0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \times 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$

b) Vol. da pasta = $V_c + a/c = (0,3333 + 0,57) \times 0,67 = 0,7933 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \times (0,4174 / 0,7933)^2 = 33,22 \text{ MPa}$

$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \times (0,4174 / 0,7933)^3 = 17,48 \text{ MPa}$

3) Diagrama de Powers para C-ART100 $\alpha_H = 100\%$ – Traço Rico – 1: 1,25 : 1,45 : 0,44

Apresenta-se, na Tabela 6-12, o diagrama de Powers do concreto C-ART100 no Traço Rico, para o grau de hidratação de 100%, aos 28 dias.

Tabela 6-12–Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TR) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias

Concreto fresco -TR		Concreto hidratado - TR	
%	Volume	Volume	%
2,23	Ar aprisionado	Vazios	3,93
20,95	Água $V_h = 0,44$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,1145$	5,45
15,87	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1844$	8,78
22,90	Areia $V_a = 0,481$	Sólidos hidratados $V_{dt} = 0,4709$	22,42
38,14	Pedra (ART100) $V_p = 0,801$	Areia $V_a = 0,481$	22,9
		Pedra(ART100) $V_p = 0,801$	38,14

3.1) Cálculo das resistências para o Traço Rico do C-ART100 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

a) Vol. de gel = $V_c + 0,746 \times V_{hc} + V_{hg} = 0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $V_c + a/c = 0,3333 + 0,44 = 0,7733 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 0,7733)^2 = 77,89 \text{ MPa}$

$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 0,7733)^3 = 62,75 \text{ MPa}$

4) Diagrama de Powers para C-ART100 $\alpha_H = 67\%$ – Traço Rico – 1: 1,25 : 1,45 : 0,44

Apresenta-se, na Tabela 6-13, o diagrama de Powers do concreto C-ART100 no Traço Rico, para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias.

Tabela 6-13–Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TR) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias

Concreto fresco - TR		Concreto hidratado-TR	
%	VOLUME	VOLUME	%
2,23	Ar aprisionado	Vazios $V = 0,071$	3,37
20,95	Água $V_h = 0,44$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,2220$	10,57
15,87	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1235$	5,88
22,9	Areia $V_a = 0,481$	Sólidos hid $V_{pt} = 0,3155$	15,02
38,14	Pedra (ART100) $V_p = 0,801$	Cimento anidro $V = 0,109989$	5,24
		Areia $V_a = 0,481$	22,9
		Pedra (ART100) $V_p = 0,801$	38,14

4.1) Cálculo das resistências para o Traço Rico do C-ART100 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

a) Volume de gel = $(0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \times 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,67 \times 0,3333 + 0,44 = 0,6633 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,6633)^2 = 47,52 \text{ MPa}$

$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,6633)^3 = 29,90 \text{ MPa}$

5) Diagrama de Powers do C-ART100 $\alpha_H = 100\%$ – Traço Pobre – 1 : 2,75 : 2,42 : 0,78

Apresenta-se, na Tabela 6-14, o diagrama de Powers do concreto C-ART100 no Traço Pobre, para o grau de hidratação de 100%, aos 28 dias.

Tabela 6-14–Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TP) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias

Concreto fresco -TP		Concreto hidratado - TP	
%	Volume	Volume	%
1,32	Ar aprisionado	Vazios	2,32
21,97	Água $V_h = 0,78$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,4545$	12,80
		Água gel $V_{hg} = 0,1844$	5,19
9,39	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Sólidos hidratados $V_{pt} = 0,4709$	13,26
29,80	Areia $V_a = 1,058$	Areia $V_a = 1,058$	29,80
37,66	Pedra (ART100) $V_p = 1,337$	Pedra (ART100) $V_p = 1,337$	37,66

5.1) Cálculo das resistências para o Traço Pobre do C-ART100 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

a) Volume de gel = $0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,3333 + 0,78 = 1,1133 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 1,1133)^2 = 37,58 \text{ MPa}$

$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 1,1133)^3 = 21,03 \text{ MPa}$

6) Diagrama de Powers do C-ART100 $\alpha_H = 67\%$ – Traço Pobre – 1 : 2,75 : 2,42 : 0,78

Apresenta-se, na Tabela 6-15, o diagrama de Powers do concreto C-ART100 no Traço Pobre, para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias.

Tabela 6-15–Diagrama de Powers do concreto C-ART100 (TP) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias

Concreto fresco - TP		Concreto hidratado-TP	
%	Volume	Volume	%
1,32	Ar aprisionado	Vazios $V = 0,071$	2,0
21,97	Água $V_h = 0,78$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,5619$	15,83
9,39	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1235$	3,48
29,80	Areia $V_a = 1,058$	Sólidos hid $V_{pt} = 0,3155$	8,89
37,66	Pedra (ART100) $V_p = 1,337$	Cimento anidro $V = 0,109989$	3,1
		Areia $V_a = 1,058$	29,80
		Pedra (ART100) $V_p = 1,337$	37,66

6.1) Cálculo das resistências para o Traço Pobre do C-ART100 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

a) Volume de gel = $(0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \times 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,67 \times 0,3333 + 0,78 = 1,00 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 1,0)^2 = 20,91 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 1,0)^3 = 8,73 \text{ MPa}$$

7) Apresenta-se na Tabela 6-16 os resultados das resistências à compressão obtidas experimentalmente, e os resultados das resistências à compressão pelo modelo de Powers (1960). As resistências do modelo de Powers (1960) foram esquematizadas pela constituição física dos concretos, para o grau de hidratação de 67% aos 28 dias.

Tabela 6-16– Resistências à compressão (C-B-1 e C-ART100):
resultados experimentais e resultados obtidos pelo modelo de Powers

Concretos- Traços	Resistência/ (Powers)-MPa	Resistência aos 28 dias-MPa (experimental)	Conclusões
C-B-1-T _R	53,81 (n=2)	37,91	Dentro do intervalo
	36,04 (n=3)		
C-B-1-T _N	35,42 (n=2)	28,28	Dentro do intervalo
	19,24 (n=3)		
C-B-1-T _P	25,73 (n=2)	19,15	Dentro do intervalo
	11,92 (n=3)		
C-ART100-T _R	47,52 (n=2)	21,89	Fora do intervalo
	29,90 (n=3)		
C-ART100-T _N	33,22 (n=2)	16,47	Próximo ao intervalo
	17,48 (n=3)		
C-ART100-T _P	20,91 (n=2)	11,08	Dentro do intervalo
	8,73 (n=3)		

As resistências teóricas do modelo proposto por Powers são um referencial para as resistências obtidas experimentalmente.

De acordo com os resultados da Tabela 6-16, observou-se que as resistências obtidas experimentalmente para os concretos de referência apresentaram valores dentro do intervalo obtido pelas equações de Powers. Para esses concretos (C-B-1), o valor da resistência experimental foi 5% superior ao valor teórico para n igual a 3, para o traço rico; para o traço normal foi 47% superior e para o traço pobre 61%.

Fazendo-se essa análise para os concretos C-ART100, verifica-se que, no caso do traço rico, houve uma queda comparativa de resistência à compressão de 27%, considerando o resultado do ensaio do corpo de prova e o resultado da estimativa pelo modelo de Powers, para n igual a 3. Portanto, ao contrário do concreto C-B-1, que apresentou leve ganho de 5%, o C-ART100 apresentou uma queda significativa neste nível de resistência do concreto (nível de resistência do traço rico). Isso sugere que, além da perda de resistência

em função da piora da pasta, quando se substitui totalmente o agregado natural pelo reciclado, há uma perda adicional em função da baixa resistência mecânica do agregado (a resistência à compressão e à tração do agregado reciclado não é conhecida).

Quando se analisa, no outro extremo, os resultados para o traço pobre, a correspondência entre a resistência do corpo de prova e pelo modelo de Powers se inverte, ou seja, há um ganho de 27%. Ou seja, quando o nível de resistência do concreto é mais baixo (nível de resistência do traço pobre) a baixa resistência do agregado reciclado não prejudica a resistência do concreto.

A posição intermediária do traço normal, indica uma leve queda de 6%. Isso dá a entender que deve existir, abaixo do teor de substituição de 50%, uma quantidade de agregado reciclado que permita obter-se resistência à compressão parelha com o concreto com agregado natural.

6.1.4.3 Diagrama e avaliação das resistências segundo o modelo de Powers (1960) do concreto C-ART50

Apresenta-se aqui o modelo representativo da composição física do concreto fresco e endurecido para os concretos C-ART50, de acordo com o modelo proposto por Powers (1960). Os modelos são constituídos de 2 diagramas: um para o grau de hidratação de 100% e o outro para o grau de hidratação de 67%, na idade aos 28 dias.

1) Diagrama de Powers para C-ART-50 $\alpha_H = 100\%$ - T. Normal – 1: 1,95 : 1,46 : 0,94 : 0,548

Apresenta-se, na Tabela 6-17, o diagrama de Powers do concreto C-ART50 no Traço Normal, para o grau de hidratação de 100%, aos 28 dias.

Tabela 6-17–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TN) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias

Concreto fresco -TN		Concreto hidratado - TN	
%	Volume	Volume	%
1,72	Ar aprisionado	Vazios	3,02
20,15	Água $V_h = 0,548$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,2225$	8,18
		Água gel $V_{hg} = 0,1844$	6,8
12,25	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Sólidos hidratados $V_{pt} = 0,4709$	17,3
27,57	Areia $V_a = 0,75$	Areia $V_a = 0,75$	27,57
19,12 x2	Pedra (B1, ART50) $V_{B1} = 0,52$ $V_{ART} = 0,52$	Pedra (B1, ART50) $V_{B1} = 0,52$ $V_{ART} = 0,52$	19,12 x 2

1.1) Cálculo das resistências para o Traço Normal do C-ART50 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

a) Volume de gel = $0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,3333 + 0,548 = 0,8813 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 0,8813)^2 = 59,97 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 0,8813)^3 = 42,39 \text{ MPa}$$

2) Diagrama de Powers para C-ART-50 $\alpha_H = 67\%$ - T. Normal – 1: 1,95 : 1,46 : 0,94 : 0,548

Apresenta-se, na Tabela 6-18, o diagrama de Powers do concreto C-ART50 no Traço Normal, para o grau de hidratação de 67%, aos 28 dias.

Tabela 6-18–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TN) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias

Concreto fresco - TN		Concreto hidratado-TN	
%	Volume	Volume	%
1,72	Ar aprisionado	Vazios $V = 0,071$	2,60
20,15	Água $V_h = 0,548$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,3299$	12,13
12,25	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1235$	4,54
27,57	Areia $V_a = 0,75$	Sólidos hid $V_{pt} = 0,3155$	11,60
19,12 x2	Pedra (B1, ART50) $V_{B1} = 0,52$ $V_{ART} = 0,52$	Cimento anidro $V = 0,109989$	4,04
		Areia $V_a = 0,75$	27,57
		Pedra (B1, ART50) $V_{B1} = 0,52$ $V_{ART} = 0,52$	19,12 x2

2.1) Cálculo das resistências para o Traço Normal do C-ART50 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

a) Volume de gel = $(0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \times 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,67 \times 0,3333 + 0,548 = 0,7713 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,7713)^2 = 35,14 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,7713)^3 = 19,02 \text{ MPa}$$

3) Diagrama de Powers para C-ART-50 $\alpha_H = 100\%$ - T. Rico – 1 : 1,25 : 1,126 : 0,73 : 0,43

Apresenta-se, na Tabela 6-19, o diagrama de Powers do concreto C-ART50 no Traço Rico, para o grau de hidratação de 100 %, aos 28 dias.

Tabela 6-19–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TR) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias

Concreto fresco -TR		Concreto hidratado - TR	
%	Volume	Volume	%
2,24	Ar aprisionado	Vazios	3,95
20,6	Água $V_h = 0,43a/c$	Água capilar $V_{hcp} = 0,1045$	5,0
	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1844$	8,82
15,94	Areia $V_a = 0,48$	Sólidos hidratados $V_{pt} = 0,4709$	22,5
22,97	Pedra (B1,ART50) $V_{B1} = 0,40 \quad V_{ART} = 0,40$	Areia $V_a = 0,48$	22,97
19,14 x2		Pedra (B1,ART50) $V_{B1} = 0,40 \quad V_{ART} = 0,40$	19,14 x2

3.1) Cálculo das resistências para o Traço Rico do C-ART50 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

$$\text{Volume de gel} = 0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volume da pasta} = 0,3333 + 0,43 = 0,7633 \text{ dm}^3$$

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 0,7633)^2 = 79,94 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 0,7633)^3 = 65,25 \text{ MPa}$$

4) Diagrama de Powers para C-ART-50 $\alpha_H = 67\%$ - T. Rico – 1 : 1,25 : 1,126 : 0,73 : 0,43

Apresenta-se, na Tabela 6-20, o diagrama de Powers do concreto C-ART50 no Traço Rico, para o grau de hidratação de 100 %, aos 28 dias.

Tabela 6-20–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TR) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias

Concreto fresco - TR		Concreto hidratado-TR	
%	Volume	Volume	%
2,24	Ar aprisionado	Vazios $V = 0,071$	3,39
20,6	Água $V_h = 0,43$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,2120$	10,1
		Água gel $V_{hg} = 0,1235$	4
15,94	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Sólidos hid $V_{pt} = 0,3155$	15,1
		Cimento anidro $V = 0,109989$	0
22,97	Areia $V_a = 0,48$	Areia $V_a = 0,48$	22,9
			7
19,14 x2	Pedra (B1,ART50) $V_{B1} = 0,40$ $V_{ART} = 0,40$	Pedra (B1,ART50) $V_{B1} = 0,40$ $V_{ART} = 0,40$	38,1
			4

4.1) Cálculo das resistências para o Traço Rico do C-ART50 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

a) Volume de gel = $(0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \times 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,67 \times 0,3333 + 0,43 = 0,6533 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,6533)^2 = 48,98 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,6533)^3 = 31,30 \text{ MPa}$$

5) Diagrama de Powers para C-ART-50 $\alpha_H = 100\%$ - T. Pobre: 1:2,75:1,875:1,21:0,73

Apresenta-se, na Tabela 6-21, o diagrama de Powers do concreto C-ART50 no Traço Pobre, para o grau de hidratação de 100 %, aos 28 dias.

Tabela 6-21–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TP) $\alpha_H = 100\%$ - 28dias

Concreto fresco -TP		Concreto hidratado - TP	
%	Volume	Volume	%
1,3	Ar aprisionado	Vazios	2,35
20,8	Água $V_h = 0,73a/c$	Água capilar $V_{hcp} = 0,4045$	11,52
	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1844$	5,25
9,5	Areia	Sólidos hidratados $V_{pt} = 0,4709$	13,42
30,20	Água $V_a = 1,06$	Areia	30,20
	Pedra (B1,ART50) $V_{B1}/V_{ART} = 0,667$	Pedra (B1,ART50) $V_{B1}/V_{ART} = 0,667$	19,0 x2

5.1) Cálculo das resistências para o Traço Pobre do C-ART50 $\rightarrow \alpha_H = 100\%$

a) Volume de gel = $0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844 = 0,6230 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,3333 + 0,73 = 1,0633 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 1,0633)^2 = 41,20 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,6230 / 1,0633)^3 = 24,14 \text{ MPa}$$

6) Diagrama de Powers para C-ART-50 $\alpha_H = 67\%$ - T. Pobre: 1 : 2,75 : 1,875 : 1,21 : 0,73

Apresenta-se, na Tabela 6-22, o diagrama de Powers do concreto C-ART50 no Traço Pobre, para o grau de hidratação de 67 %, aos 28 dias.

Tabela 6-22–Diagrama de Powers do concreto C-ART50 (TP) $\alpha_H = 67\%$ - 28dias

Concreto fresco - TP		Concreto hidratado-TP	
%	Volume	Volume	%
1,3	Ar aprisionado	Vazios $V = 0,071$	2,01
20,8	Água $V_h = 0,73$ (a/c)	Água capilar $V_{hcp} = 0,5119$	14,58
9,5	Cimento anidro $V_c = 0,3333$	Água gel $V_{hg} = 0,1235$	3,52
30,20	Areia $V_a = 1,06$	Sólidos hid $V_{pt} = 0,3155$	8,98
19,0 x2	Pedra (B1,ART50) $V_{B1}/V_{ART} = 0,667$	Cimento anidro $V = 0,109989$	3,13
		Areia $V_a = 1,06$	30,20
		Pedra (B1,ART50) $V_{B1}/V_{ART} = 0,667$	19,0 x2

6.1) Cálculo das resistências para o Traço Pobre do C-ART50 $\rightarrow \alpha_H = 67\%$

a) Volume de gel = $(0,3333 + 0,746 \times 0,1411 + 0,1844) \times 0,67 = 0,4174 \text{ dm}^3$

b) Volume da pasta = $0,67 \times 0,3333 + 0,73 = 0,9533 \text{ dm}^3$

c) Aplicando a fórmula

$$P/n=2 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,9533)^2 = 23,00 \text{ MPa}$$

$$P/n=3 \rightarrow f_c = 120 \cdot (0,4174 / 0,9533)^3 = 10,07 \text{ MPa.}$$

7) Apresenta-se, na Tabela 6-23, os resultados das resistências à compressão obtidas experimentalmente, e os resultados das resistências à compressão pelo modelo de Powers (1960). As resistências do modelo de Powers (1960) foram esquematizadas pela constituição física dos concretos, para o grau de hidratação de 67% aos 28 dias.

Tabela 6-23– Resistências à compressão (C-B-1 e C-ART50):
resultados experimentais e resultados obtidos pelo modelo de Powers

Concretos Traços	Resistência/ (Powers)-MPa	Resistência aos 28 dias-MPa (experimental)	Conclusões
C-B-1-T _R	53,81(n=2)	37,91	Dentro do intervalo
	36,04 (n=3)		
C-B-1-T _N	35,42 (n=2)	28,28	Dentro do intervalo
	19,24 (n=3)		
C-B-1-T _P	25,73 (n=2)	19,15	Dentro do intervalo
	11,92 (n=3)		
C-ART50-T _R	48,98 (n=2)	30,04	Fora ao intervalo
	31,30 (n=3)		
C-ART50-T _N	35,14 (n=2)	25,84	Dentro ao intervalo
	19,02 (n=3)		
C-ART50-T _P	23,00 (n=2)	18,52	Dentro do intervalo
	10,07 (n=3)		

De acordo com os resultados da Tabela 6-23, observou-se que as resistências obtidas experimentalmente para os concretos de referência apresentaram valores dentro do intervalo obtido pelas equações de Powers. Para esses concretos (C-B-1), o valor da resistência experimental foi 5% superior ao valor teórico para n igual a 3, para o traço rico; para o traço normal foi 47% superior e para o traço pobre 61%.

Fazendo-se essa análise para os concretos C-ART50, verifica-se que, no caso do traço rico, houve uma queda comparativa de resistência à compressão de 4%, considerando o resultado do ensaio do corpo de prova e o resultado da estimativa pelo modelo de Powers, para n igual a 3. Portanto, ao contrário do concreto C-B-1, que apresentou leve ganho de 5%, o C-ART50 apresentou uma queda neste nível de resistência do concreto (nível de resistência do traço rico). Isso sugere que, além da perda de resistência em função da piora da pasta, quando se substitui parcialmente o agregado natural pelo reciclado, há uma perda adicional em função da baixa resistência mecânica do agregado (embora a resistência à compressão e à tração do agregado reciclado não seja conhecida).

Quando se analisa, no outro extremo, os resultados para o traço pobre, a correspondência entre a resistência do corpo de prova e pelo modelo de Powers se inverte, ou seja, há um ganho de 84%. Ou seja, quando o nível de resistência do concreto é mais baixo (nível de resistência do traço pobre) a baixa resistência do agregado reciclado não prejudica a resistência do concreto.

A posição intermediária do traço normal indica um ganho na resistência à compressão de 36% para o concreto C-ART50, ou seja, o valor obtido no ensaio do corpo de prova de concreto foi superior ao valor estimado pelo modelo de Powers. Para o concreto C-B-1 o ganho foi de 61%. Isso dá a entender que deve existir, abaixo do teor de substituição de 50%, uma quantidade de agregado reciclado que permita obter-se resistência à compressão parelha com o concreto com agregado natural, ou seja, um teor de substituição em que o agregado não interfira negativamente na resistência da pasta, para a faixa de resistência estudada.

No gráfico da Figura 6.7 apresenta-se a relação entre as resistências ($R_{c, \text{Experimental}} / R_{c, \text{Powers}}$) dos concretos de referência e concretos C-ART100 e C-ART50.

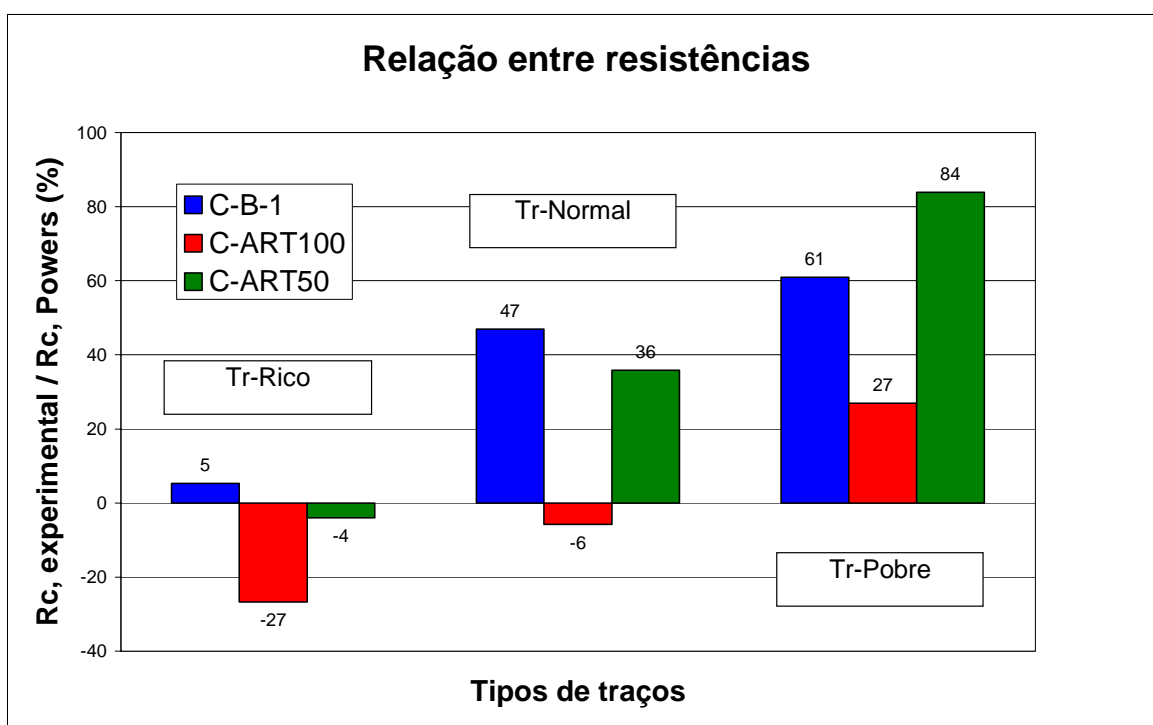


Figura 6.7 – Relação entre as resistências $R_{c, \text{experimental}} / R_{c, \text{Powers}}$ dos concretos C-B-1, C-ART100 e C-ART50

6.1.5 Traços adicionais

Em busca de descobrir a amplitude de interferência do ART no concreto, decidiu-se fazer a preparação invertida, ou seja, fazer concretos primeiramente introduzindo a argamassa em vez de iniciar a colocação do agregado reciclado de telha (ART) junto com a água de amassamento, como foi mencionado no item 4.3.3.2

Assim, foram produzidos três traços de concreto na seqüência invertida, adicionando-se o aditivo na mistura, conforme descrição da Tabela 6-24, os traços são designados como traço C, D e E. O aditivo adicionado foi o Conplast SP430 da Fosroc (1% da massa de cimento). O objetivo pretendido, ao usá-lo nas misturas, era justamente possibilitar redução da relação $a/c_{efetiva}$, para que se obtivessem melhores resistências à compressão.

Também se produziu mistura de concreto com substituição de 8% da massa de cimento pelos finos do ART, traço indicado na Tabela 6-24 como F.

Produziu-se ainda, mistura de concreto com adição de cimento para retornar a relação $a/c_{inicial}$, traço indicado na Tabela 6-24 como G.

Na Tabela 6-24, encontram-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos C-B-1 e C-ART100 designados como traços adicionais, no traço normal. Para cada dosagem e idade foram executados 2 corpos-de-prova, sendo adotado o maior valor deles.

Tabela 6-24–Resultados obtidos dos traços adicionais dos concretos no estado endurecido

Traço	Relação a/c a/c (efetiva)	Consumo de cimento kg/m ³	Resistência à compressão (fc) (MPa)	Massa esp. aparente (kg/m ³)
C-B-1 - Traço normal com B-1 – Seqüência normal				
T _N -1:1,95:2,92	0,545	367,73	18,49 (7)	2430
			28,28 (28)	2450
C-B-1 - Traço normal com B-1 – Seqüência invertida				
T _B - 1:1,95:2,92	0,54	368,42	20,25 (7)	2450
			29,34 (28)	2460
C-ART100 – Traço normal - Seqüência normal				
T _N - 1:1,95:1,88	0,568	364,58	11,11 (7)	2130
			16,47 (28)	2040
C-ART100 – Traços adicionais – Traço normal - Seqüência invertida				
T _C - 1:1,95:1,88	0,54	368,42	14,67 (7)	2160
			22,58 (28)	2080
T _D - 1:1,95:1,88	0,547	367,45	12,95 (7)	2160
			19,43 (28)	2070
T _E - 1:1,95:1,88	0,57	364,31	15,71 (7)	2190
			22,06 (28)	2080
C-ART100 – Traços adicionais – Traço normal - Seqüência normal				
T _F - 1:1,95:1,88	0,596	360,82	11,48 (7)	2150
			17,36 (28)	2030
T _G - 1:1,95:1,88	0,545	367,73	12,13 (7)	2160
			18,00 (28)	2090

Quando se resolveu produzir os concretos C-ART100 com aditivo, na seqüência invertida e no traço Normal, ou seja, fazendo-se primeiramente a argamassa, deparou-se com a necessidade de se produzir o concreto de referência na mesma seqüência invertida, para que se pudessem comparar os resultados; o traço do concreto C-B-1, no traço normal, seqüência invertida, foi designado por traço B.

Observou-se que houve melhoras para os traços adicionais dos concretos, nos quais se empregou o aditivo (T_C , T_D e T_E), pois diminuiu a relação a/c_{efetiva} e houve aumento nas resistências aos 7 e 28 dias, quando comparados com o concreto C-ART100 (este na seqüência normal). No caso do traço com substituição de 8% de cimento (em massa) pelos finos do ART (traço F) e, ainda, no caso da adição de cimento para retornar à relação a/c inicial (traço G) também ocorreram melhoras, embora pequenas, quando se compara com o concreto C-ART100.

No gráfico da Figura 6.8, apresentam-se os resultados de resistência à compressão, aos 7 dias, dos concretos denominados traços adicionais.

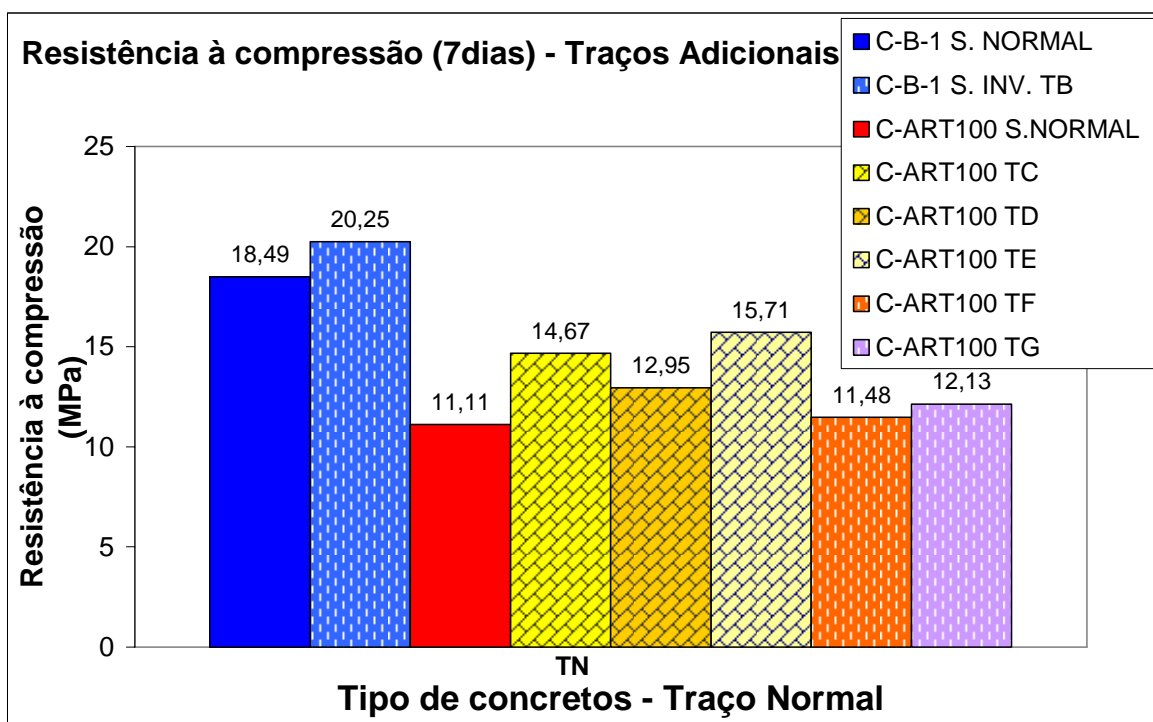


Figura 6.8 – Resultados de resistência à compressão, aos 7 dias, dos traços adicionais

Fazendo-se a comparação dos concretos, no tocante à resistência à compressão dos traços adicionais, aos 7 dias, de acordo com o gráfico da Figura 6.8, pode-se dizer:

- 1- o concreto C-ART100 apresentou uma queda de 40% com relação ao concreto C-B-1.
- 2- comparando-se os concretos produzidos na seqüência invertida:

Concretos com aditivo (T_C , T_D e T_E) em relação ao concreto no traço T_B : o T_C apresentou uma queda na resistência à compressão, aos 7 dias, de 28%; para o T_D a queda foi de 36% e para o T_E a queda foi de 22%.

3- ao comparar, agora, os concretos produzidos na seqüência normal, observa-se que ao se adicionar finos do ART no concreto C-ART100, houve um ganho de 3% na resistência em relação ao C-ART100 sem os finos, no entanto, ainda prevaleceu uma queda grande de resistência com relação ao concreto C-B-1, ou seja de 38%, não sendo, portanto, uma solução para aproximar a resistência do concreto ART100 à do concreto com B-1.

4- ao se comparar, também, os concretos na seqüência normal (o traço T_G do concreto C-ART100 com o concreto C-B-1), observou-se que aumentando-se o consumo de cimento, para retornar à relação a/c inicial do concreto C-B-1, houve um ganho de 9% na resistência em relação ao C-ART100; no entanto, da mesma forma que no caso da introdução dos finos, o ganho não foi suficiente para aproximar a resistência do concreto ART100 à do concreto C-B-1, apresentando ao final uma queda de 34%.

No gráfico da Figura 6.9, apresentam-se os resultados de resistência à compressão dos concretos denominados traços adicionais, na idade de 28 dias.

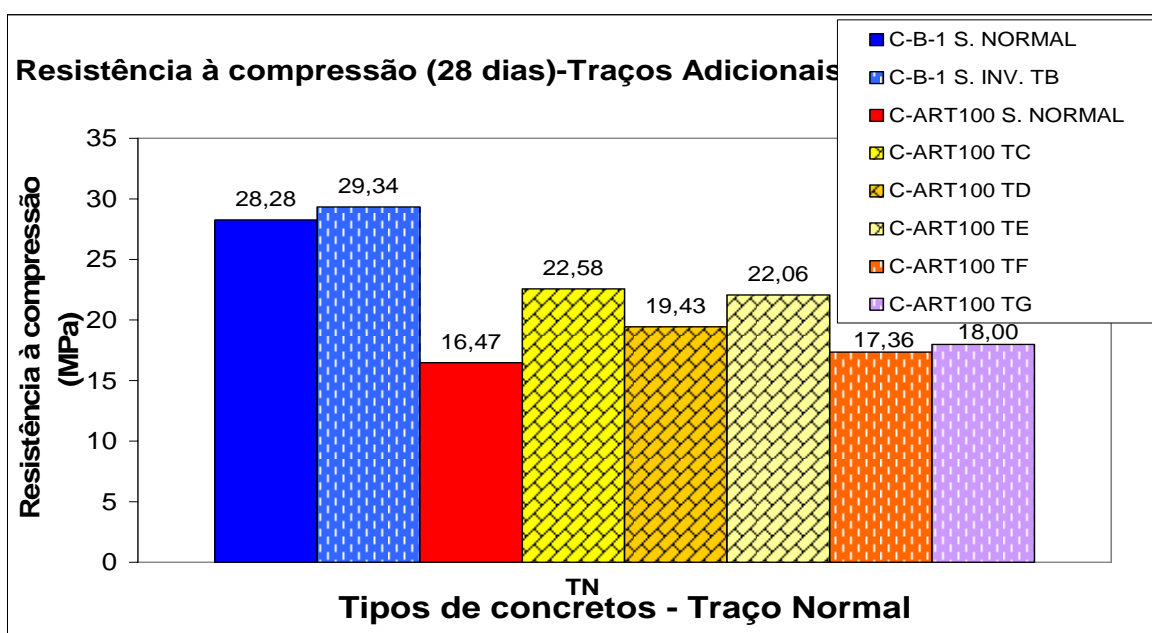


Figura 6.9 – Resultados de resistência à compressão, aos 28 dias, dos traços adicionais

Fazendo-se a comparação dos concretos, no tocante à resistência à compressão dos traços adicionais, aos 28 dias, de acordo com o gráfico da Figura 6.9, pode-se dizer:

1- o concreto C-ART100 apresentou uma queda no valor da resistência à compressão, aos 28 dias, de 42% com relação ao concreto C-B-1.

2- comparando-se os concretos produzidos na seqüência invertida:

Concretos com aditivo em relação ao concreto no traço T_B : o T_C apresentou uma queda de 23%, foi o que mais se aproximou do C-B-1; para o T_D a queda foi de 34% e para o T_E a queda foi de 25%.

3- ao comparar, agora, os concretos na seqüência normal, observa-se que ao se adicionar finos do ART, no concreto C-ART100, houve um ganho de 6% na resistência em relação ao C-ART100 sem os finos, no entanto, ainda prevaleceu uma queda significativa da resistência à compressão com relação ao concreto C-B-1, ou seja de 39%, não sendo, portanto, uma solução para aproximar a resistência do concreto ART100 à do concreto com B-1.

4- ao comparar, ainda, os concretos na seqüência normal (o traço T_G do concreto C-ART100 com o concreto C-B-1), observou-se que aumentando-se o consumo de cimento para retornar à relação a/c inicial do concreto C-B-1 houve um ganho de 9% na resistência em relação ao C-ART100, no entanto, da mesma forma que no caso da introdução dos finos, o ganho não foi suficiente para aproximar a resistência do concreto ART100 à do concreto C-B-1, sendo que a queda final foi de 36%; neste caso há o agravante do maior consumo de cimento por m^3 de concreto, que passou de 364,58 kg para 367,73 kg.

Portanto, os resultados, em geral, indicam que a substituição total da B-1 por ART, leva à queda significativa da resistência à compressão quando se compara com o concreto com Brita 1.

Embora as alternativas estudadas com os traços adicionais tenham indicado que houve um aumento de resistência desses traços em relação ao concreto C-ART100, o ganho ainda foi pequeno para aproximar da resistência do concreto C-B-1.

6.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Em análises de projetos estruturais, é indispensável a avaliação quanto à resistência à compressão, mas para alguns casos é muito importante a determinação da resistência à tração do concreto, como para projetos de placas de rodovias e aeroportos. De modo que são as tensões à tração que controlam a fissuração do concreto, sendo estas ocasionadas pelas diferenças de temperatura e umidade, ou fissuração aos esforços de compressão (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

6.2.1 Resistência à tração por compressão diametral

Os valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados naturais e reciclados foram determinados segundo as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 1994). A resistência à tração por compressão diametral foi determinada nas idades de 7 e 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Foram moldados e ensaiados 2 corpos-de-prova para cada traço, mas somente o maior resultado de cada par de CP's foi considerado. Ilustra-se na Figura 6.10 o ensaio realizado no laboratório para a determinação da resistência à tração por compressão diametral.

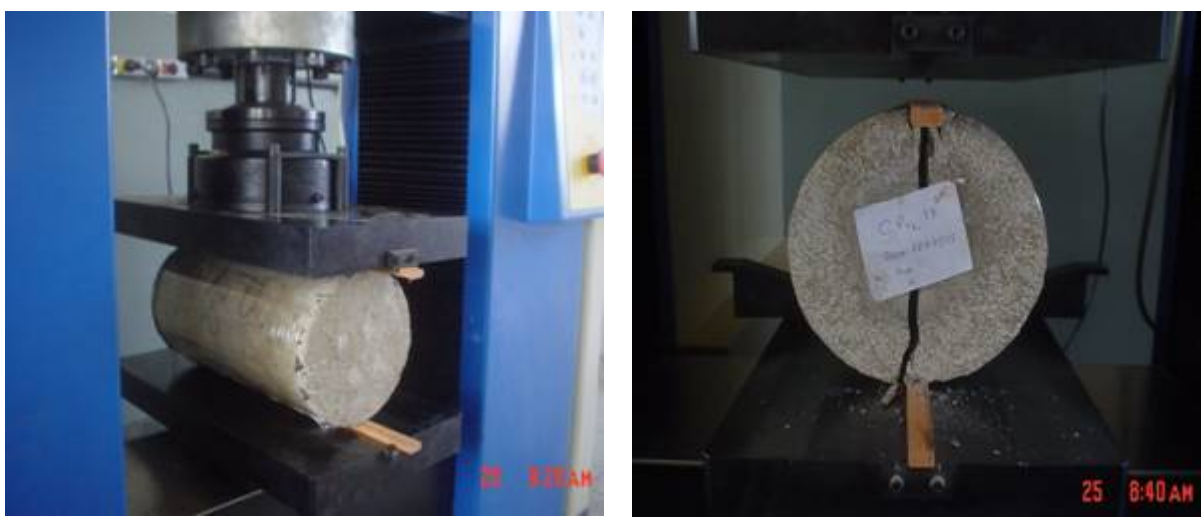


Figura 6.10 - a) corpo-de-prova a ser rompido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. b) corpo-de-prova rompido

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão estão apresentados na Tabela 6-25.

Tabela 6-25–Resultados de resistência à tração por compressão diametral e à compressão dos concretos (MPa)

Concreto e traço	Resistência à tração por compressão diametral		Resistência à compressão axial		$f_{ct,sp}/f_c$	$f_{ct,sp}/f_c$
					(%)	(%)
	$f_{ct,sp}$ -7dias	$f_{ct,sp}$ - 28dias	f_c -7 dias	f_c - 28 dias	7 dias	28 dias
C-B-1-T _R	2,37	2,81	27,81	37,91	8	7
C-B-1-T _N	1,96	2,28	18,49	28,28	11	8
C-B-1-T _P	1,57	2,02	13,12	19,15	12	10
C-ART100 T _R	1,46	1,59	15,08	21,89	10	7
C-ART100 T _N	1,04	1,25	11,11	16,47	9	8
C-ART100 T _P	0,60	1,00	7,41	11,08	8	9
C-ART50 T _R	1,81	2,01	20,24	30,04	9	7
C-ART50 T _N	1,58	1,86	16,31	25,84	10	7
C-ART50 T _P	0,94	1,52	10,62	18,52	9	8

Na Tabela 6-25, verifica-se que os concretos C-ART100, quando rompidos aos 7 dias, apresentam uma queda na resistência à tração por compressão diametral, quando comparados com os concretos de referência, de 38% para o traço rico, 47% para o traço normal e 62% para o traço pobre. Para os concretos C-ART50 a queda foi de 24% para o traço rico, 19% para o traço normal e 40% para o traço pobre.

Quando rompidos aos 28 dias, ocorreu uma queda na resistência à tração por compressão diametral dos concretos C-ART100, quando comparados com os concretos de referência, de: 43% para o traço rico, 45% para o traço normal e 50% para o traço pobre. Para os concretos C-ART50, a diminuição foi de 28% para o traço rico, 18% para o traço normal e 25% para o traço pobre.

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 67) relatam que “a razão entre as resistências à tração uniaxial e à compressão é geralmente em torno de 0,07 a 0,11”.

Como se mostram na Tabela 6-25, os resultados da relação da resistência à tração por compressão diametral pela resistência à compressão variaram entre 7 a 11%, para as idades

de 7 e 28 dias, coincidindo assim, com a faixa de variação estipulada por Mehta e Monteiro (1994).

A razão da resistência à tração pela resistência à compressão depende do nível geral da resistência à compressão, ou seja, quanto maior a resistência à compressão menor será esta relação. Esta relação é determinada por vários fatores nas propriedades da matriz e na zona de transição do concreto, tais como, relação água/cimento, tipo de agregado, aditivos e o tempo de cura da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

6.2.2 Resistência à tração na flexão

Os valores de resistência à tração na flexão dos concretos com agregados naturais e reciclados foram determinados segundo as recomendações das MB – 3483 (ABNT, 1991) e NBR 12142 (ABNT, 1994). A resistência à tração na flexão foi determinada na idade aos 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova prismáticos com 150 mm de altura, 150 mm de largura e 450 mm de comprimento. Foram moldados e ensaiados 2 corpos-de-prova para cada traço, mas somente o maior resultado foi considerado. Ilustra-se na Figura 6.11 o ensaio de determinação da resistência à tração na flexão, realizado no laboratório.



Figura 6.11 – a) corpo-de-prova a ser rompido no ensaio de resistência à tração na flexão
b) corpo-de-prova rompido

Apresentam-se, na Tabela 6-26, os resultados dos rompimentos dos ensaios à tração por compressão diametral e tração na flexão e a determinação das suas relações com a resistência à compressão.

Tabela 6-26–Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos

Concreto	Tração na flexão	Tração (MPa)	Compressão axial (Mpa)	$f_{ct,sp}/f_c$	$f_{ct,f}/f_c$	$f_{ct,sp}/f_{ct,f}$
	$f_{ct,f}$ -28dias	$f_{ct,sp}$ -28dias	f_c -28 dias	%	%	%
C-B-1-T _R	4,53	2,81	37,91	7	12	62
C-B-1-T _N	3,71	2,28	28,28	8	13	61
C-B-1-T _P	2,45	2,02	19,15	10	13	82
C-ART100 T _R	2,14	1,59	21,89	7	10	74
C-ART100 T _N	2,07	1,25	16,47	8	13	60
C-ART100 T _P	1,69	1,00	11,08	9	15	59
C-ART50 T _R	2,59	2,01	30,04	7	9	78
C-ART50 T _N	2,35	1,86	25,84	7	9	79
C-ART50 T _P	2,09	1,52	18,52	8	11	73

Para todos os corpos-de-prova dos concretos com agregados naturais e reciclados, a ruptura se deu no terço médio do corpo de prova.

A relação da resistência à tração por compressão diametral pela resistência à compressão ($f_{ct,sp}/f_c$) variou nos concretos C-ART100 na proporção de 7% para o traço rico (alta resistência), 8% para o traço normal (média resistência) e 9% para o traço pobre (baixa resistência). Para os concretos C-ART50 foi a proporção de 7% para o traço rico (alta resistência), 7% para o traço normal (média resistência) e 8% para o traço pobre (baixa resistência).

Mehta e Monteiro (1994) encontraram em concretos com resistência à compressão de 7 a 62 MPa, a razão entre as resistências à tração uniaxial e à compressão em torno de 10 a 11% para concreto de baixa resistência, 8 a 9% para concreto de média resistência e 7% para concreto de alta resistência. Os resultados apontados pelos autores indicam que as relações $f_{ct,f}/f_c$ são maiores que as relações $f_{ct,sp}/f_c$.

De fato, observando-se na Tabela 6-26, os resultados demonstram que as relações $f_{ct,f}/f_c$ são maiores que as relações $f_{ct,sp}/f_c$ para os concretos estudados.

Outrossim, observando os resultados dos ensaios à tração na flexão dos concretos C-ART100, verifica-se uma queda aos 28 dias, quando comparados com os concretos de referência de: 53% para o traço rico, 44% para o traço normal e 31% para o traço pobre. Já para os concretos C-ART50 as quedas foram de 43% para o traço rico, 37% para o traço normal e 15% para o traço pobre.

Leite (2001) demonstrou que o agregado graúdo reduz muito a resistência à tração do concreto. A autora informa também que os resultados de resistência à tração por compressão diametral apresentaram uma tendência de redução em relação às resistências à tração na flexão variando de 11 até 30%. Já para os concretos com agregados reciclados, informa a autora, houve tendência de redução de 21% até 41%.

Visualiza-se no gráfico da Figura 6.12 a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão.

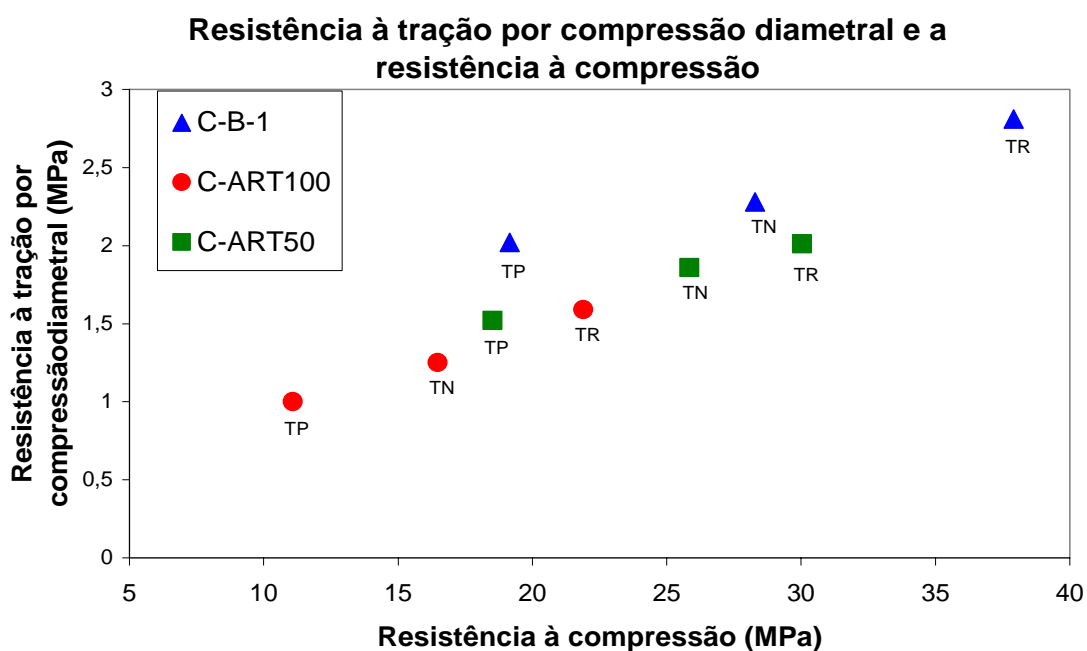


Figura 6.12 – Relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 28 dias

Visualiza-se o gráfico na Figura 6.13 a relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão.

Resistência à tração na flexão e a resistência à compressão

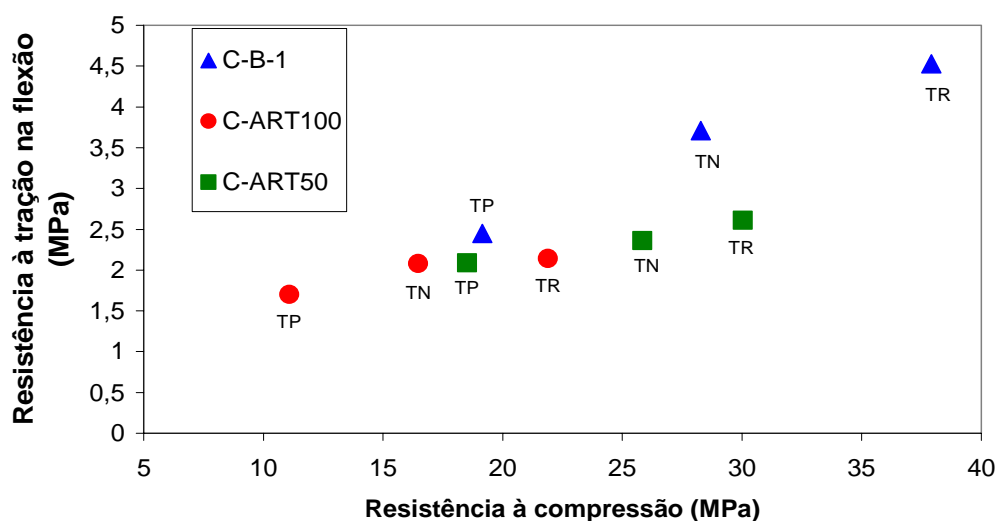


Figura 6.13 – Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão aos 28 dias

Os resultados da resistência à tração, por compressão diametral e à flexão, dos concretos C-ART100 e C-ART50 apresentaram uma diminuição quando comparados com os concretos com agregados naturais, de acordo com os gráficos da Figura 6.12 e da Figura 6.13.

6.2.3 Considerações gerais

As razões entre as resistências à tração uniaxial e à compressão estiveram em torno de 7% a 11% para os concretos estudados.

Os resultados da resistência à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos com agregado reciclado apresentaram diminuição quando comparados com os concretos com a B-1.

Os resultados obtidos para as relações $f_{ct,f}/f_c$ mostram que são realmente maiores que as relações $f_{ct,sp}/f_c$.

6.3 MASSA ESPECÍFICA SECA

As massas específicas secas dos concretos foram determinadas segundo as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 1987), na idade de 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada dosagem, considerando a média entre os resultados. Na Tabela 6-27, apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 6-27-Resistência à compressão e massa específica seca dos concretos

Concreto -Traço	Massa esp. seca (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Fator de eficiência MPa.dm ³ /kg
Concreto: C-B-1				
C-B-1T _R -1:1,25:2,25:0,4	2359	37,91	486,35	16,07
C-B-1T _N -1:1,95:2,92:0,545	2350	28,28	367,45	12,03
C-B-1T _P -1:2,75:3,75:0,678	2282	19,15	287,90	8,39
Concreto: C-ART100				
C-ART100T _R -1:1,25:1,45:0,41	1941	21,89	485,15	11,28
C-ART100T _N -1:1,95:1,88:0,568	1888	16,47	364,58	8,72
C-ART100T _P -1:2,75:2,42:0,78	1858	11,08	279,44	5,96
Concreto: C-ART50				
C-ART50T _R -1:1,25:1,125:0,73:0,40	2179	30,04	487,56	13,79
C-ART50T _N -1:1,95:1,46:0,94:0,545	2121	25,84	367,73	12,18
C-ART50T _P -1:2,75:1,875:1,21:0,73	2078	18,52	283,56	8,91

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o Guia de Concreto Estrutural com Agregado Leve da ACI 213R-87 define que concreto estrutural com agregado leve deve ter resistência à compressão, aos 28 dias, acima de 17 MPa e sua massa específica seca ao ar não deve exceder a 1850 kg/m³.

Rossignolo (2003), em suas pesquisas, encontrou dados referentes aos limites de massa específica dos concretos leves em diversas normas, como no RILEM (1975) com $\gamma < 2000$ kg/m³, no CEB-FIF (1977) como $\gamma < 2000$ kg/m³; na NS 3473 E (1992) com intervalos

entre $1200 \text{ kg/m}^3 < \gamma < 2200 \text{ kg/m}^3$; na ACI 213R-87 com intervalos entre $1400 \text{ kg/m}^3 < \gamma < 1850 \text{ kg/m}^3$ e no CEN PREN 206-25 (1999) com intervalos entre $800 \text{ kg/m}^3 < \gamma < 2000 \text{ kg/m}^3$.

A norma NM 35 (ABNT, 1995) especifica que o concreto estrutural, feito com agregado leve, deve seguir determinados valores de resistência à compressão sem exceder os valores máximos correspondentes de massa específica aparente. Os valores especificados nesta norma estão indicados na Tabela 6-28.

Tabela 6-28-Valores estipulados segundo da norma NM 35 (ABNT, 1995)

Resistência à compressão aos 28 dias		Massa específica aparente do concreto	
Valores mínimos (MPa)		Valores máximos (kg/m^3)	
28		1840	
21		1760	
17		1680	

Observou-se assim, que os resultados da massa específica seca dos concretos C-ART100 deram abaixo de 2000 kg/m^3 e suas resistências não atingiram os 17 MPa, no traço normal e pobre, já para o traço rico ultrapassou os 17 MPa. Para os concretos C-ART50, os valores da massa específica seca deram entre 2000 kg/m^3 e 2200 kg/m^3 e suas resistências foram acima de 17 MPa.

Outro dado relacionado a essa questão é o que prescreve a norma da ABNT NM 35/95 para concretos leves, na qual os agregados leves não devem possuir massa unitária no estado seco e solto, acima 1120 kg/m^3 para os agregados miúdos e 880 kg/m^3 para os agregados graúdos. O resultado dos ensaios da massa unitária do ART foi 994 kg/m^3 , mostrando assim que o agregado está acima da faixa estipulada.

Ao se comparar a massa específica seca dos concretos de referência com os concretos com agregados reciclados, nos dados estabelecidos pela Tabela 6-27, nota-se que há, em média, uma queda de 19% para os concretos C-ART100 e 9% para os concretos C-ART50.

A Figura 6.14 ilustra os resultados das resistências e das massas específicas secas dos concretos reunidos em um único gráfico.

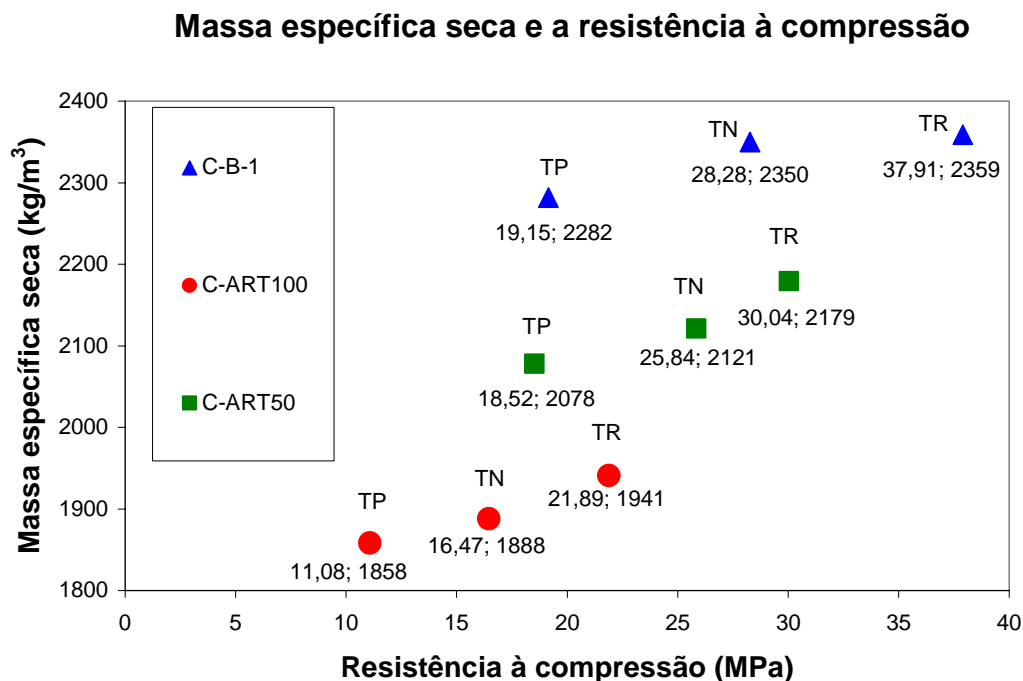


Figura 6.14 – Relação da massa específica seca com a resistência à compressão dos concretos (ensaios aos 28 dias)

Verifica-se, pelo gráfico da Figura 6.14, que à medida que a massa específica seca cresce a resistência à compressão também evolui, o que se pode explicar pela própria composição dos traços.

No geral, embora não se possa afirmar que os concretos com ART atendem exatamente as prescrições da literatura para concretos estruturais leves, o que se conclui é que, com a substituição de 100% da B-1 por ART, há uma queda média no valor da massa específica aparente seca de 19%, já para a substituição de 50%, a queda foi de 9%.

Em seu trabalho, Rossignolo (2003) apresentou um parâmetro que relaciona a resistência à compressão e à massa específica, denominado Fator de Eficiência, representado pela equação 6.14. Segundo o autor, considera-se, por exemplo, um concreto leve de alto desempenho, como sendo um concreto com resistência à compressão de 30 MPa, desde que sua massa específica seja inferior a 1200 kg/m^3 , resultando no F_e de $25 \text{ MPa.dm}^3/\text{kg}$.

Esse autor menciona que Spitzer (1994) considera concreto leve de alto desempenho quando o fator de eficiência está acima de 25 MPa.dm³/kg.

Em experiências realizadas por Ferreira Júnior (1997) concretos com agregados naturais apresentaram fator de eficiência variando entre 15 e 25 MPa.dm³/kg, segundo Rossignolo (2003).

$$Fe = \frac{fc}{\gamma}$$

6.14

Onde:

Fe = fator de eficiência, em MPa.dm³/kg

f_c = resistência à compressão, em MPa

γ = massa específica seca do concreto, em kg/ dm³

Fonte: Rossignolo (2003)

Ressalta-se, para efeito de comparação dos resultados, que Rossignolo (2003) utilizou em seu trabalho consumos altos de cimento, acima de 450 kg/m³ chegando até 750 kg/m³. Neste presente trabalho os consumos de cimento variaram entre 280 e 488 kg/m³.

Dessa forma, para os concretos C-B-1 o fator de eficiência variou entre 8,4 e 16,0 MPa.dm³/kg; para os concretos C-ART100, o fator de eficiência variou entre 6 e 11 MPa.dm³/kg, resultando decréscimo em média de 29% em relação aos concretos C-B-1. Outrossim, para os concretos C-ART50, houve, em média, decréscimo de 14% para o traço rico, já para os traços normal e pobre houve acréscimo, em média, de 3,7%.

Verifica-se com esses dados que é interessante a substituição parcial da B-1 pelo ART, ao invés da substituição total. O gráfico da Figura 6.15 ilustra os resultados obtidos dos ensaios realizados com os concretos na idade de 28 dias.

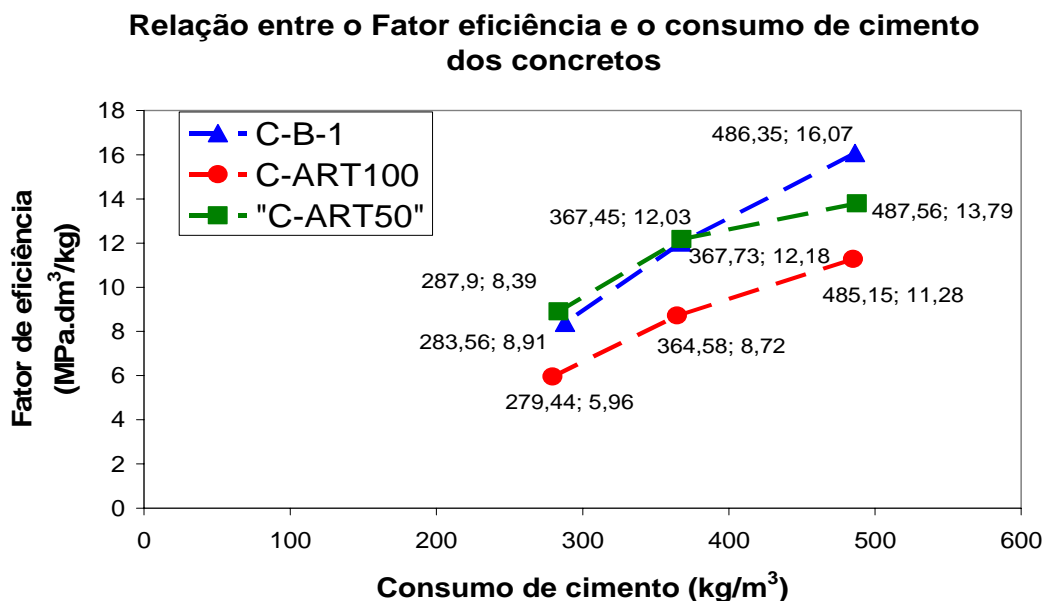


Figura 6.15 – Relação entre o Fator de eficiência e o consumo de cimento (ensaios aos 28 dias)

O gráfico da Figura 6.16 apresenta a relação entre a resistência à compressão e o consumo de cimento dos concretos ensaiados na idade de 28 dias.

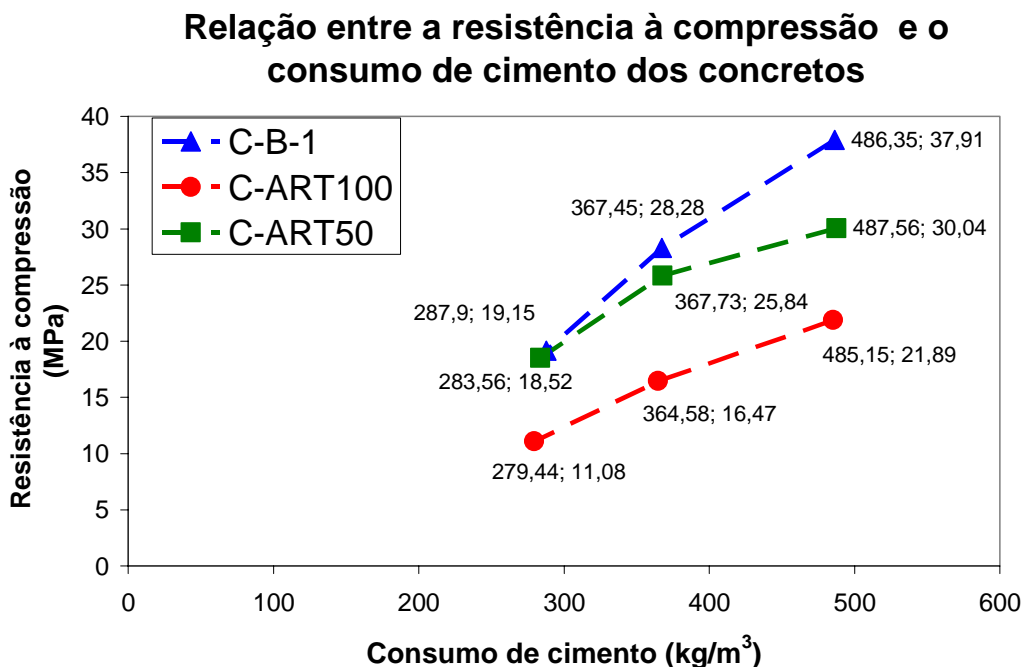


Figura 6.16 – Relação entre a Resistência à compressão e o consumo de cimento (ensaios aos 28 dias)

Os dados da Figura 6.16 sugerem que à medida que aumenta o consumo de cimento por metro cúbico de concreto, maior é a queda de resistência quando da substituição da B-1 pelo agregado reciclado. Para os traços tipo pobre e normal, a resistência à compressão dos concretos com substituição de 50% se aproxima da resistência do concreto de referência.

6.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

A determinação dos valores de absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos foi realizada segundo as recomendações da NBR 9778 (1987), na idade de 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada dosagem, e foi considerada a média dos valores dos resultados.

A Tabela 6-29 se refere aos dados dos ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios.

Tabela 6-29-Absorção de água e Índice de vazios		
Concreto-Traço	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
NBR 9778 (72 h)		
Concretos: C-B-1		
T _R - 1:1,25:2,25:0,4	4,58	10,85
T _N - 1:1,95:2,92:0,545	4,64	10,83
T _P - 1:2,75:3,75:0,678	5,84	13,37
Concretos: C-ART100		
T _R - 1:1,25:1,45:0,41	11,91	23,64
T _N - 1:1,95:1,88:0,568	12,10	23,89
T _P - 1:2,75:2,42:0,78	13,28	24,72
Concretos: C-ART50		
T _R - 1:1,25:1,125:0,73:0,40	6,49	14,13
T _N - 1:1,95:1,46:0,94:0,545	8,51	18,02
T _P - 1:2,75:1,875:1,21:0,73	9,87	20,50

Levy (2001, p. 137) informa que “quando se monitora a absorção de água, na realidade procura-se determinar o total dos poros permeáveis na estrutura de concreto. Já o índice de vazios está relacionado a todos os poros existentes na estrutura de concreto”.

Pelos resultados apresentados na Tabela 6-29, observa-se que, para os concretos de referência, a taxa de absorção de água, em média, foi de 5% e o índice de vazios, em média, 11,7 % resultados aos 28 dias.

Os concretos C-ART100 apresentaram taxa de absorção, em média, de 12,4 % e o índice de vazios, em média, 24,1 %, resultados aos 28 dias.

Os concretos C-ART50 apresentaram taxa de absorção, em média, de 8,29 % e o índice de vazios em média 17,5 %, resultados aos 28 dias.

Fazendo-se a comparação com os concretos de referência (C-B-1), para a absorção de água, notou-se, que:

Os concretos C-ART100 apresentaram aumento de: 160% no caso do traço rico; para o traço normal o aumento foi de 161% e para o traço pobre 127%.

Os concretos C-ART50 apresentaram aumento de: 41,7% no caso do traço rico; para o traço normal o aumento foi de 83% e para o traço pobre 69%.

Já os índices de vazios obtidos para os concretos C-ART100 mostraram aumento em relação aos concretos de referência, de: 117% para o traço rico, 121% para o traço normal e 85% para o traço pobre; para os concretos C-ART50, os aumentos foram de 30% para o traço rico, 66% para o traço normal e 53% para o traço pobre.

Segundo Levy (2001), nos resultados de sua pesquisa, observando o comportamento do concreto de referência com agregado natural, para as resistências variando de 20 a 40 MPa, a absorção por imersão variou de 7,4 até 6,1% e o índice de vazios de 16,0 até 13,6%.

Já para o concreto com 100% de agregado reciclado, o valor da absorção aumentou em mais de 60% em relação ao concreto de referência. O autor observou que a absorção e o índice de vazios para os concretos com agregados reciclados aumentaram em relação aos

concretos de referência, devido ao tipo de agregado, que é poroso e possui alta taxa de absorção de água. O autor chegou à conclusão, em suas experiências, que a absorção total varia mais em função do tipo de agregado utilizado do que em função da relação a/c adotada.

6.5 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

A determinação dos valores do módulo de deformação e do diagrama tensão-deformação foi realizada segundo a NBR 8522 (ABNT, 2003), nas idades de 7 e 28 dias. Para cada traço e idade foram moldados 2 corpos-de-prova, adotando-se o maior valor entre eles. Foi calculado, então, o valor do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, que é considerado equivalente ao módulo secante ou cordal entre 0,5 MPa e 30% f_c .

Alguns pesquisadores estudaram esta propriedade, como Barra (1996), Bicca (2000), Leite (2001), Levy (2001), Rossignolo (2003), e os resultados que obtiveram indicam que houve certa concordância quanto à redução do valor do módulo com o aumento do teor de agregados reciclados no concreto.

Ilustra-se na Figura 6.17, o ensaio da determinação do módulo de deformação estabelecida pela norma NBR 8522 (ABNT, 2003).



Figura 6.17 – Ensaio do módulo de elasticidade a) corpo-de-prova a ser rompido b) corpo-de-prova rompido

A Tabela 6-30 apresenta-se os resultados dos módulos de deformação dos concretos C-B-1 e dos concretos C-ART100 e C-ART50.

Tabela 6-30 – Resultados dos ensaios do módulo de deformação tangente inicial e a resistência à compressão dos concretos

Traço	Concreto	Módulo de deformação tangente inicial		Resistência à comp. média
		NBR 8522 (ABNT, 2003) (GPa)		(MPa)
		7 dias	28 dias	28 dias
T _R -1: 1,25:2,25:0,40	C-B-1	27,254	43,039	33,69
T _N -1: 1,95:2,92:0,545	C-B-1	30,865	39,737	26,67
T _P -1: 2,75:3,75:0,678	C-B-1	32,579	36,702	18,50
T _R -1: 1,25:1,45:0,44	C-ART100	16,306	17,605	19,95
T _N -1: 1,95:1,88:0,57	C-ART100	10,617	16,266	13,04
T _P -1: 2,75:2,42:0,78	C-ART100	10,189	14,774	10,28
T _R -1: 1,25:1,125:0,73:0,43	C-ART50	23,050	28,049	29,65
T _N -1: 1,95:1,46:0,94:0,548	C-ART50	20,342	24,461	24,61
T _P -1: 2,75:1,875:1,21:0,73	C-ART50	16,184	23,291	17,51

No gráfico da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 6.18, apresenta-se os valores obtidos para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos (conforme os dados da Tabela 6-30).

Observa-se no gráfico da Figura 6.18 que os valores da resistência à compressão e do módulo de elasticidade são mais baixos à medida que aumenta o teor de agregado reciclado (ART) nos concretos.

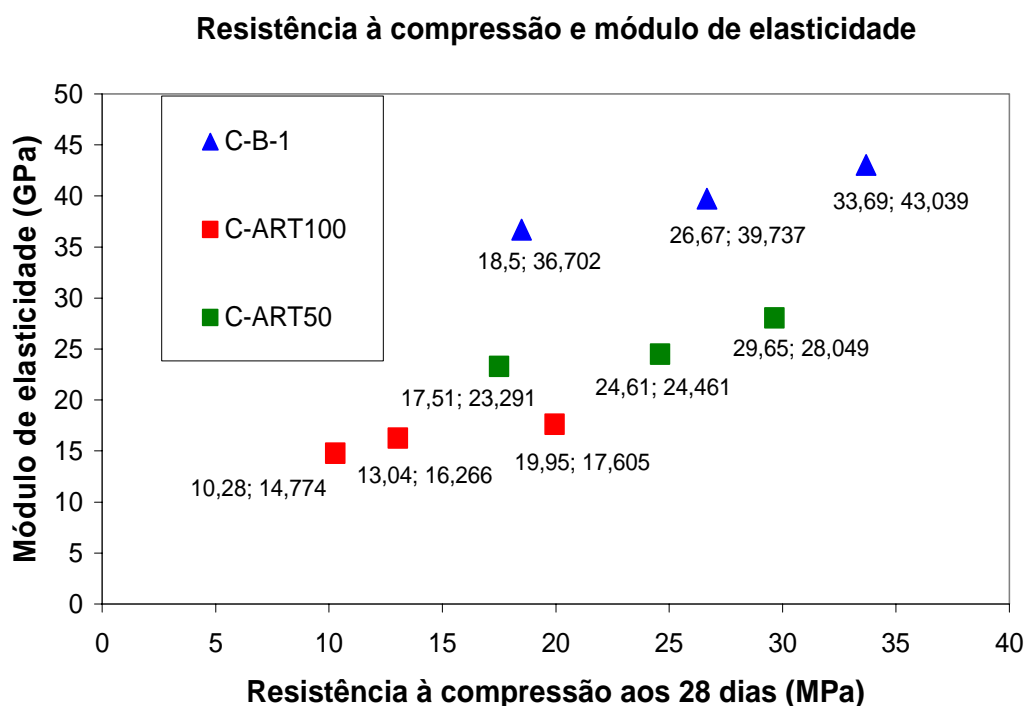


Figura 6.18 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos C-B-1, C-ART100 e C-ART50

Mehta e Monteiro (1994, p. 87) relatam que “os valores dos módulos de deformação usados nos cálculos para projetos de concreto são normalmente estimados a partir de expressões empíricas que pressupõem dependência direta entre o módulo de deformação e a resistência e densidade do concreto”. Assim, com dos dados da Tabela 6-30, determinou-se as equações entre o módulo e a resistência dos concretos, baseando-se na fórmula $E_c = K f_c^n$, pelo método dos mínimos quadrados.

Na Figura 6.19 apresenta-se as curvas obtidas das equações de comportamento do módulo de elasticidade em relação à resistência à compressão.

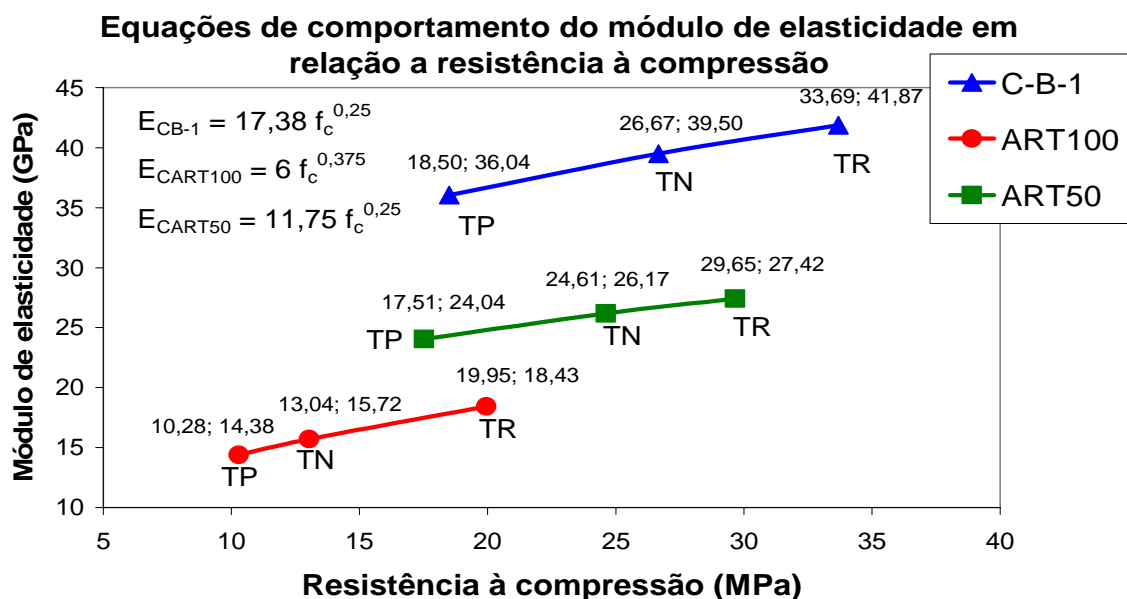


Figura 6.19 – Equações de comportamento - módulo de elasticidade × resistência à compressão - obtidas com os resultados dos experimentos

No gráfico da Figura 6.20 ilustra-se as projeções dos valores do módulo de elasticidade conforme a variação da resistência à compressão, utilizando as equações de comportamento.

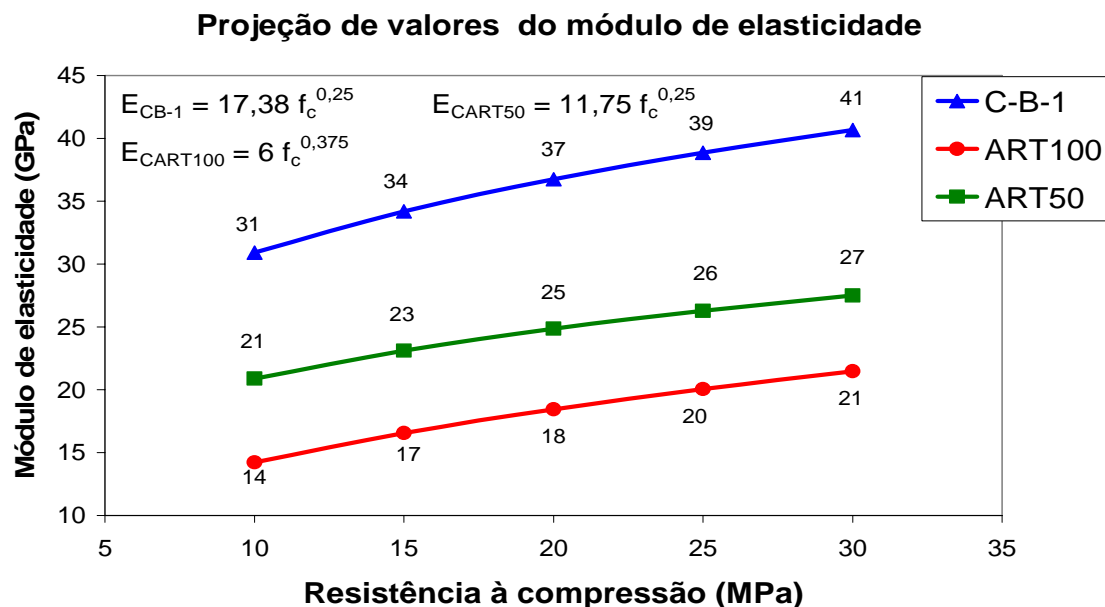


Figura 6.20 – Projeção de valores do módulo de elasticidade, a partir das equações de comportamento, conforme a variação da resistência à compressão

Verifica-se no gráfico da Figura 6.19, que os valores dos módulos dos concretos C-B-1 são bem superiores aos dos concretos C-ART100 e C-ART50, ou seja, a substituição da brita natural pelo agregado reciclado leva a valores bem mais baixos.

Pode-se ainda, observar na Figura 6.20, que a tendência de crescimento do valor do módulo com o aumento da resistência à compressão é um pouco mais baixa para os concretos com agregados reciclados, em comparação com os concretos com brita basáltica.

Mehta e Monteiro (1994) relatam que a porosidade no agregado é um fator gerador que afeta o módulo de elasticidade dos concretos e afirmam que as propriedades do agregado como dimensão máxima, a forma, a textura superficial, a granulometria e a sua composição mineralógica, influenciam no módulo de deformação do concreto.

O agregado reciclado de telha-ART possui uma superfície rugosa e muito porosa, embora não se possa afirmar que isso é a causa dos valores mais baixos do módulo de deformação dos concretos com ele preparados, isso certamente influenciou nos resultados.

Buscou-se ainda, no trabalho, fazer análise dos valores dos módulos obtidos experimentalmente (NBR 8522/2003) em confronto com as equações do CEB (1990) do *Comitê Euro-Internacional du Béton* e a norma ACI 318 (1992) da *American Concrete Institute*, conforme apresentação na Tabela 6-31.

Tabela 6-31 - Equações do módulo de elasticidade (CEB e ACI)

Norma	Equação	Observações
CEB (1990)	$E_c = 10 * f_c^{1/3}$ (GPa)	f_{cm} = resistência média aos 28 dias
ACI 318 (1992)	$E_c = 0,043 * \gamma^{1,5} * f_c^{0,5}$ (MPa)	$f_{cm} < 41$ MPa

Nota: E_c = módulo de elasticidade; f_{cm} = resistência média aos 28 dias (MPa); γ = massa específica aparente (kg/m³)

Na Tabela 6-32 apresenta-se os valores dos módulos obtidos pelas equações do CEB e da ACI, utilizando os dados experimentais dos concretos estudados.

Tabela 6-32-Valores do módulo de deformação obtidos pelas equações do CEB e da ACI para os concretos C-B-1, C-ART100 e C-ART50

Concreto Traço	Resistência à compressão média aos 28 dias - f_{cm} (MPa)	Massa específica aparente (kg/m^3)	E_c Experimental aos 28 dias (GPa)	E_c (GPa)	
				CEB	ACI 318
C-B-1-T _R	33,69	2450	43,039	32,29	30,26
C-B-1-T _N	26,67	2450	39,737	29,87	26,930
C-B-1-T _P	18,50	2440	36,702	26,44	22,291
C-ART100-T _R	19,95	2140	17,605	27,12	19,013
C-ART100-T _N	13,04	2130	16,266	23,53	15,264
C-ART100-T _P	10,28	2070	14,774	21,74	12,984
C-ART50-T _R	29,65	2290	28,049	30,95	25,659
C-ART50-T _N	24,61	2250	24,461	29,08	22,767
C-ART50-T _P	17,51	2220	23,291	25,96	18,821

Mehta e Monteiro (1994) informam que o módulo de deformação de um concreto com agregado leve gira em torno de 14 a 21 GPa , sendo 50% a 75% do módulo do concreto de peso normal com a mesma resistência.

Neville (1997) considera que o módulo dos concretos preparados com agregado leve tem, normalmente, valores entre 40% a 80% do módulo de um concreto comum de mesma resistência.

Utilizando as projeções dos valores dos módulos, para concretos com a mesma resistência projetada entre 10 MPa e 30 MPa, conforme a Figura 6.20, observa-se que os concretos ART100, apresentam valor de módulo de aproximadamente 49%, em média, do valor do módulo do concreto de referência (C-B-1). Para os concretos ART100 os valores dos módulos obtidos nos ensaios variaram de 14 a 18 GPa.

Ao se comparar concreto com substituição parcial da B-1 pelo ART, os valores projetados para o módulo se aproximam mais daqueles dos concretos com B-1, atingindo, em média, 67%. Neste caso, os valores dos módulos obtidos nos ensaios variaram de 23 a 28 GPa.

Analisando-se os dados da Tabela 6-32 os valores médios da diferença entre os valores experimentais e os obtidos pelas equações foram:

- pela equação do CEB (1990) os valores dos módulos resultam, em média, 35% abaixo dos valores obtidos nos experimentos com os concretos C-B-1.
- para os concretos com agregados reciclados, empregando a fórmula do CEB houve inversão dos resultados, ou seja, os valores projetados pela equação foram, em média, 48,7% superiores aos dos valores experimentais para os concretos C-ART100 e 13,6% para os concretos C-ART50.
- pela equação da ACI 318 os valores dos módulos resultam, em média, 34% abaixo dos valores obtidos nos experimentos com os concretos C-B-1.
- para os concretos com agregados reciclados, empregando a equação da ACI, os valores projetados pela foram, em média, 9% inferiores aos dos valores experimentais para os concretos C-ART100, exceto para o traço rico que apresentou resultado 8% superior ao experimental, e para os concretos C-ART50 os valores obtidos pelo ACI foram, em média, 11,5% inferiores aos valores experimentais.

Dessa forma, a equação da norma ACI 318, dentre as analisadas, apresentou-se como a mais recomendada para fornecer uma estimativa dos valores dos módulos de deformação para os concretos com os agregados reciclados utilizados, pois os valores experimentais se aproximam ou superam os valores obtidos pela equação.

Concluindo-se assim, a redução dos valores do módulo de deformação deve-se essencialmente à baixa resistência à compressão dos agregados reciclados de telha.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES FINAIS

Apresentam-se, na seqüência, as principais conclusões relacionadas à produção e às propriedades do concreto com agregado reciclado de telha.

7.1 INFLUÊNCIA DO ART NA PRODUÇÃO DO CONCRETO

Para se ter confiabilidade nos resultados é necessário um cuidado especial na elaboração e execução da metodologia para avaliação do concreto produzido. A metodologia adotada na produção dos concretos com o agregado reciclado de telha foi a do IPT-EP/USP (HELENE; TERZIAN,1992), que otimiza o teor de argamassa e permite a obtenção do diagrama de dosagem, que é útil para a avaliação do concreto estudado.

Em virtude da massa específica do agregado reciclado de telha ser bem menor do que a da brita basáltica utilizada, os concretos com o agregado reciclado foram estabelecidos a partir da substituição volumétrica do agregado graúdo natural pelo reciclado.

Verificou-se, nos experimentos realizados, que a absorção do agregado reciclado de telha é elevada, bem acima dos valores de absorção de agregados reciclados de RCD encontrados na literatura consultada; a sucção de água nos primeiros instantes também é elevada, mas cai rapidamente. Isso demonstra a necessidade de se misturar parte da água relacionada à capacidade de absorção do agregado antes da mistura com o cimento, para prevenir a dificuldade encontrada para obter misturas homogêneas.

A constatação nos ensaios de absorção de água por imersão, projetada para a preparação da mistura do concreto, permite supor que o agregado reciclado não absorverá massa de água que represente mais do que 90% da sua capacidade máxima de absorção, ou seja, de sua

absorção_{SSS}. Nos casos estudados, o índice médio máximo do consumo excedente de água (aquele que supera a água da relação $a/c_{\text{inicial,provável}}$, definida a partir do traço ajustado para a brita natural) foi de 89,5% da absorção_{SSS} do agregado.

No caso dos traços pobres estudados, o consumo de água de amassamento, para atender a consistência estipulada, foi maior do que a quantidade de água inicial provável, aumentando portando, a relação $a/c_{\text{inicial,provável}}$.

No geral, os resultados apontam para 85% da absorção_{SSS}. Considerando ainda, que nessas determinações não se levam em conta a participação do cimento e da areia, há que se prever que esses materiais vão concorrer com o agregado reciclado no consumo de água, o que vai reduzir a taxa de absorção inicial. Neste caso, a indicação da NBR 15116 (ABNT, 2004) de pré-molhagem com quantidade de água equivalente a 80% do teor de absorção do agregado reciclado é adequada para prevenir a sucção inicial elevada.

A determinação da relação a/c final é trabalhosa e imprecisa, mas pode-se inferir seu valor a partir do conhecimento da absorção do agregado (absorção_{SSS}) e do seu comportamento quanto à capacidade de sucção de água com o tempo.

Sugere-se para a determinação da capacidade de absorção de água de agregados reciclados o procedimento baseado no ensaio de secagem, segundo Dias (2004b), que tem apresentado boa reprodutibilidade e facilidade de execução para este tipo de agregado, inclusive quando contém frações finas. A correlação deste valor com a capacidade de sucção do agregado com o tempo permite vislumbrar a capacidade máxima de absorção de água que o agregado apresentará durante o período de amassamento do concreto.

Conhecido o percentual adequado para a pré-molhagem do agregado, concluiu-se que o agregado, em qualquer teor de umidade natural deveria ser previamente colocado na betoneira, por cerca de dois minutos, com a quantidade de água que representasse 80% da sua absorção_{SSS}, incluído nesse caso o percentual de umidade natural.

Do ponto de vista da trabalhabilidade não se observou nenhuma restrição ao uso do agregado reciclado de telha, ou seja, não houve perda de abatimento significativa ao longo da preparação dos corpos de prova, não houve dificuldade de adensamento, tampouco segregação e exsudação. Talvez o concreto, com agregado reciclado, por ser mais leve,

ofereça alguma compensação para a maior rugosidade e irregularidade de formato do agregado graúdo, o fato é que não se detectou problema algum do ponto de vista de manuseio do concreto e preparação dos corpos de prova.

Conclui-se que a substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado não inviabiliza a produção do concreto, mas exige o conhecimento da absorção_{SSS} e do comportamento à sucção de água com o tempo, para se estimar a água de mistura que atenda a maior absorção do agregado reciclado.

7.2 INFLUÊNCIA DO ART NO ESTADO ENDURECIDO

A substituição total do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado de telha provocou queda significativa na resistência à compressão; em média (média dos resultados dos traços pobre, normal e rico) a queda ficou em torno de 42%, quando para a preparação do concreto se fixou o abatimento; para o módulo de deformação houve queda média em torno de 60%.

A queda na resistência à tração, com a substituição total, foi mais variável. Os resultados na flexão foram: queda de 53% para o traço rico, de 44% para o traço normal e de 31% para o traço pobre. Os resultados na compressão diametral foram: queda de 43% para o traço rico, de 45% para o traço normal e de 50% para o traço pobre.

A massa específica do concreto endurecido com ART diminuiu em relação ao concreto com a B-1 basáltica. A queda foi maior, como é de se esperar, para a substituição de 100%. A correspondência da massa específica com a resistência à compressão mostrou a mesma tendência para todos os concretos estudados, ou seja, as resistências foram maiores para massas específicas mais altas. A queda da massa específica seca foi em média, de 19%, ao se comparar os concretos C-ART100 com os concretos C-B-1.

A absorção e o índice de vazios dos concretos com ART aumentaram quando comparados com os concretos com B-1 e foi maior para a substituição de 100%.

Na análise visual da seção de fratura dos corpos-de-prova de C-ART100, submetidos ao ensaio de resistência à compressão, nos traços rico, normal e pobre, verificou-se que, além da ruptura na interface argamassa×agregado, houve ruptura nos agregados (ART), o que

não ocorre nos concretos com o agregado basáltico utilizado, em virtude de sua alta resistência à compressão.

Pode-se conjecturar a respeito da perda de resistência mecânica dos concretos com agregado reciclado, imputando ao aumento da relação a/c_{efetiva} , a menor resistência do agregado reciclado de telha, e quem sabe da menor resistência da interface pasta-agregado, mas isso não foi investigado.

Os experimentos com 100% de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado de telha, adicionando-se o aditivo Conplast SP430 (Fosroc), no traço normal, resultaram em resistências à compressão mais favoráveis do que aquelas sem aditivo. Neste caso a queda média de resistência do concreto com ART mais aditivo, em relação ao concreto de referência (C-B-1), foi de 25%, em contraposição ao concreto sem aditivo que apresentou queda de 42%. O ganho de resistência pode ser imputado à diminuição da relação a/c_{efetiva} obtida. Esses concretos C-ART100 com aditivo apresentaram resistência média à compressão aos 28 dias de 21 MPa, ou seja, 30% acima da resistência do concreto C-ART100 sem aditivo.

Já a substituição parcial do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado de telha provocou queda, que variou em torno de 3 a 21%, na resistência à compressão, e em torno de 37% no valor do módulo de deformação.

A queda na resistência à tração foi variável. Os resultados na flexão foram: queda de 43% para o traço rico, de 37% para o traço normal e de 15% para o traço pobre. Os resultados na compressão diametral foram: queda de 28% para o traço rico, de 18% para o traço normal e de 25% para o traço pobre.

A queda da massa específica seca foi em média, de 9%, ao se comparar os concretos C-ART50 com os concretos C-B-1.

Desta forma, a substituição parcial de 50% do agregado natural pelo reciclado, resultou em resistência à compressão mais próxima da resistência do concreto de referência.

Os resultados dos concretos com substituição de 50% são animadores, pois os valores alcançados são perfeitamente compatíveis para obras de menor vulto em condições

adequadas de proteção para o concreto, concreto com revestimento de argamassa, por exemplo. Para o traço rico, com consumo de 487 kg/m^3 , a resistência obtida foi de 30 MPa; para o traço normal, com consumo de 367 kg/m^3 , foi 26 MPa; e para o traço pobre, com consumo de 283 kg/m^3 , a resistência à compressão foi de 18,5 MPa. Todos os resultados aos 28 dias.

Esta constatação leva a crer que deve haver um percentual de substituição da B-1 pelo ART, que resulte em resistência à compressão parelha entre os concretos (com agregado natural e com substituição parcial), dentro da faixa de resistência estudada neste trabalho e isso é muito positivo para a utilização do resíduo na produção de concretos corriqueiros.

Por ultimo, o estudo indica que o resíduo, até então considerado como um problema ambiental pode ser utilizado em concretos, na faixa de resistência estudada, sem perda significativa de resistência à compressão, quando se substituiu 50% do agregado graúdo natural. A durabilidade desses concretos deve ser investigada.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a execução desta pesquisa, algumas dificuldades, limitações e dúvidas foram constatadas e como numa única pesquisa é impossível vencer todas as possibilidades de estudo sobre o comportamento de determinado material, são sugeridos alguns temas para estudos futuros:

- Estudo da resistência mecânica à compressão do agregado reciclado de telha.
- Estudo da durabilidade de concretos quando os agregados naturais são substituídos parcial ou totalmente pelo agregado reciclado graúdo de telha.
- Estudos da interface pasta/agregado dos concretos com agregados reciclados de telha.
- Avaliação da fluência de concretos com agregados reciclados de telha.
- Avaliação do comportamento do concreto com agregado reciclado de telha em relação à retração e expansão por umidade.

- Avaliação do percentual de substituição da B-1 pelo ART, que resulte em resistência à compressão parelha com os concretos com agregado natural.
- Avaliação dos benefícios aos concretos com agregado de telha cerâmica com aditivos diversos.

REFERÊNCIAS

ÂNGULO, S.C.; JOHN, V.M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ANTAC, 2002.

ÂNGULO, S.C.; JOHN, V.M. Variabilidade dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**. São Paulo, v.1, n.1, p.22-32, maio 2004.

ÂNGULO, S.C.; KAHN, H.; JOHN, V.M.; ULSEN, C. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 6., 2003, São Paulo. **Materiais reciclados e suas aplicações**. São Paulo: IBRACON, 2003. (CT-2006, meio ambiente).

AKHTARUZZAMAN, A. A.; HASNAT, A. Properties of concrete using crushed brick as aggregate. **Concrete International**, Detroit, v. 5, n. 2, p. 58-63, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregado para concreto. Rio de Janeiro, maio 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: agregado. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, ago. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, jul. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: agregado graúdo. Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, mar. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9937**: agregados. Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, ago. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo. Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, jul. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: agregados. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman. Rio de Janeiro, mar. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: agregado em estado solto. Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, abr. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810**: agregado em estado compactado seco. Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, mar. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 23**: cimento portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, fev. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: concreto fresco. Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, maio 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**: concreto. Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, fev. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, fev. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, jul. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: concreto. Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, dez. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB 3483**: concreto. Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, dez. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: argamassa e concreto. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, mar. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: concreto. Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, dez. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, mar. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento portland. Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, abr. 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Dados do setor**. 2006. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/abc_0.asp> Acesso em: 15 maio 2006.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Dados do setor**. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br>> Acesso em: 10 jan. 2002.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado**. 1996. 223p. Tesis (Doctoral) - Universt Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1996.

-
- BAUER, L. A. F. (Coord.) **Materiais de construção 1**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 1994. 435p.
- BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**.1999. 100 p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1999.
- BICCA, I. S. **Estudo da viabilidade do rejeito cerâmico, como agregado graúdo, na produção de concreto com características estruturais**. 2000. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- CACHIM, P; Pais, T.; Soares, J. Utilização de tijolo como agregado para betão. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURA DE CONCRETO, 4., 2006, Aveiro, Portugal.. **Anais...** Aveiro: SIMP0001, 2006. p.2015-2028.
- CARRIJO, P.M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- CHINI, A.R.; MONTEIRO, F.M.B. Use of recycled concrete aggregates as a base course. In: ANNUAL CONFERENCE CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY, 35., 1999, California. **Proceedings...**California: ASC, 1999. p.307-18.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE **Resolução nº. 307 de 5 de julho de 2002**. Dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil. 2002. Disponível em: <<http://www.ibamapr.hpg.ig.com.br/30702RC.htm>> Acesso: 13 dez.2004.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. 3.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997a. v.1, 401p.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. 3.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997b. v.2, p.219.

-
- COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão**. 2.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994. v.3, 368p.
- CREMONINI, R. A.; DAL MOLIN, D.C.C.; CECCATO, D. M.; MANCIO, M.; GOULART, J. Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Norie, 2001.
- D'ÁVILA, A.P.R.T. Reciclagem de resíduos cimentícios na construção civil. . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo. [s.n.] 1999. 13p.
- DEVENNY, A.; KHALAF, F.M. The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete. **Mansory International**, v. 12, n. 3, p.81-84, 1999.
- DIAS, J.F., JOHN, V.M. Resíduos de cerâmica vermelha. **Jornal Cerâmica Estrutural**, Florianópolis, julho. 2001.
- DIAS, J.F.; AGOPYAN, V.; BERNUCCI, L.L.B.; SILVA, T.J. Procedimento alternativo para otimizar misturas de solo-agregado. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 2001. No prelo.
- DIAS, J.F., JOHN, V.M., CINCOTTO, M.A. Diagnóstico visando a reciclagem de resíduos de cerâmica vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 45., 2001, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: ABC, 2001. p.1-13. 1 CD-ROM.
- DIAS, J.F.; AGOYAN, V.; BERNUCCI, L.B.; MOURA, E. Estudo em laboratório de resíduo da fabricação de telhas cerâmicas para uso em pavimentação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 33., 2001, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n], 2001. p.517-525. 1 CD-ROM.
- DIAS, J.F.; TOFOLLI, S.M.; AGOPYAN, V. Absorção de telhas de cerâmica vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 48., 2004, Curitiba. **Anais...** São Paulo: ABC, 2004. ref.5-64. 10p. 1 CD-ROM.

DIAS, J.F.; AGOPYAN, V. Determinação da absorção de agregados reciclados porosos. In: claDS'04 ENTAC'04, 4., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Antac, 2004. cód. 1094. 10p.1 CD-ROM

DIAS, J.F. A construção civil e o meio ambiente. In: CONGRESSO ESTADUAL DE POFISSIONAIS CREA-MG, 5., 2004, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: [s.n.], 2004a.

DIAS, J.F. **Avaliação de agregados reciclados de resíduos de fabricação de telhas de cerâmica vermelha para seu uso em camadas de baixo custo**, 2004. Tese(Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004b.

EUROPEAN COMMISSION. **Management of construction and demolition waste.**

2000. Working document 1. DG ENV E.3. Disponível

em:<http://europa.eu.int/comm/enterprise/environment/index_home/waste_management/constr_dem_waste_000404.pdf.>Acesso em: set.2002.

FERRAZ, G. R.; MASSUDA O. ASSIS, C.S.; OLIVEIRA, M.J.E.; ZAMATARO, R.S.I.; PIRES, M.A.F. 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: IPEN, 2001. p.75-86. (IBRACON CT-206).

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. C. Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. 170 p. p.107-115.

HANSEN T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry.** London: Chapman & Hall, 1992. 305p. (RILEM Report 6)

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

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

HENDRIKS, C. F.; PIETERSEN, H. S. Concrete: durable, but also sustainable? In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Ed.). **Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 1-18.

HENDRIKS, C. H.; PIETERSEN, H. S.; FRAAY, A. F. A. Recycling of building and demolition waste – an integrated approach. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tecnologia de edificações**. São Paulo: Pini, 1988.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Conservação de energia na indústria cerâmica: manual de recomendações**. São Paulo, 1980.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KNIGHTS, J. Relative performance of high quality concrete containing recycled aggregates and their use in construction. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Ed.). **Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 275-286.

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

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2002. 194p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LIMA, J.A. Ribeiro. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999.

240p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIMBACHIYA, M. C. (Ed.). **Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998b. p. 419-431.

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

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MOREL, A.; GALLIAS, J. L.; BAUCHARD, M.; MANA, F.; ROSSEAU, E. Practical guidelines for the use of recycled aggregates in concrete in France and Spain. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ... Great Britain: E & FN Spon, 1993. p.71-82.**

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

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

POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L.; FOLK, H.; KOU, S.C.; Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research Elmsford**, v.34, p.31-36, 2004.

POWERS, T.C. Properties of cement pate and concrete. In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM, 4., 1960, Washington. **Chemistry of cement**. Washington: National Bureau of Standarrds, 1962. Session V. Paper V-1.

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos - dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 211p. Tese(Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Escola de Engenharia de São

Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SANTOS, G.M. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha**. 2001. 135p. Dissertação(Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. F. Recycling of masonry rubble. In: HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. Part 2, p.161-255. (RILEM TC Report 6).

SJÖSTRÖM, C. Durability and sustainable use of building materials. In: LLEWELLYN, J. W.; DAVIES, H. (Ed.). **Sustainable use of materials**. London: BRE/RILEM, 1992.

SOARES, S.R.; CASTILHOS Jr., A.B.; MARTINS, A.; BREITENBACH, F.E.; LUPATINI, G. **Análise do ciclo de vida de produtos (revestimento, blocos e telhas) do setor cerâmico da indústria de construção civil**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. (Relatório parcial I/ IV)

SIMPÓSIO NACIONAL: desperdício de materiais nos canteiros de obras: a quebra do mito, 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Computação de Construção Civil,1999. 48 p.

SOUZA, V. B. **Avaliação da geração de entulho em conjunto habitacional popular**. 2005. Dissertação(Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

WAINWRIGHT, P. J.; TREVORROW, A.; YU, Y.; WANG, Y. Modifying the performance of coarse and fine recycled concrete aggregates. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM, 3., 1993, Odense, Denmark. **Proceedings ...** Great Britain: E & FN Spon, 1993. p.319 – 330.

ANEXO A

TABELA DE MATERIAIS PARA DEFINIR TEOR DE ARGAMASSA

	<i>a</i>	cimento	areia	B-1	água	águas	a/c	slump
iniciar	0,40	10,00	14,00	36,00		5,000		15
acréc.					0,83	5,83	0,583	170
acréc.		0,91	4,55					
iniciar	0,45	10,91	18,55	36,00	0,30	6,130	0,560	25
Total					0,19	6,320	0,580	37
acréc.		0,46	2,31					
iniciar	0,48	11,54	21,69	36,00		6,000	0,520	45
acréc.					0,115	6,115	0,530	40
Total					0,100	6,215	0,5386	60
acréc.		0,46	2,31					
iniciar	0,50	12,00	24,00	36,00	0,248	6,463	0,5386	62
acréc.								
acréc.		0,50	2,50					
iniciar	0,52	12,50	26,50	36,00	0,2695	6,7325	0,5386	55
acréc.					0,080	6,8125	0,5450	58
acréc.					0,063	6,8755	0,550	64
Total					0,1250	7,000	0,560	82
acréc.		0,83	4,20					
iniciar	0,55	13,33	30,7	36,00	0,460	7,460	0,560	58
Total					0,130	7,590	0,570	62

ANEXO B

TABELA DE MATERIAIS – CONCRETO C-B-1 (CP II E 32 Cauê)

	α	cimento	areia	B-1	água	águas	a/c	slump
09/11/2005 – Traço Normal						S - 80 ± 20 mm		
iniciar	50,00	60,00	120,00	180,00	32,40		0,54	48
acréc.					1,20	33,60	0,56	94
acréc.		1,60						85
Total		61,60	120,00	180,00		33,60	0,545	85
Traço	50	1	1,95	2,92			0,545	

10/11/2006 - Traço Rico						S - 80 ± 20 mm		
iniciar	50	70	87,5	157,50	28,00		0,40	90
Traço		1	1,25	2,25			0,40	

11/11/2006 - Traço Pobre						S - 80 ± 20 mm		
iniciar	50	50,00	137,50	187,50	33,50		0,67	60
acréc.					0,40	33,90	0,678	78
Total		50,00	137,50	187,50		33,90	0,678	
Traço	50	1	2,75	3,75			0,678	

ANEXO C

TABELA DE MATERIAIS - CONCRETO C-ART!00 (CP II E 32 Cauê)

	α	cimento	areia	ART	água	águas	a/c	slump
09/02/2006 – Traço Normal						S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	1,95	1,88			0,545	
iniciar		60,00	117,00	112,80	32,70		0,545	
acréc.					15	47,7	0,795	40
acréc.					2	49,7	0,83	70
iniciar		30,00	58,50	56,40	16,35		0,545	
acréc.					7,9+0,2	24,45	0,815	60
acréc.					0,3+0,15	24,90	0,83	80
07/03/2006 - Traço Rico						S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	1,25	1,45			0,40	
iniciar		35	43,75	50,75	14,00		0,40	
acréc					7,5	21,50	0,61	75
iniciar		35	43,75	50,75	14,00		0,40	
acréc					7,5+0,5	22,00	0,63	40
acréc					0,2+0,25	22,45	0,64	55/75
13/02/2006 - Traço Pobre						S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	2,75	2,42	33,90		0,678	
iniciar		25	68,75	60,5	16,95		0,678	
acréc.					10,00+0,5	27,45	1,10	45/55
acréc.					0,5	27,95	1,12	78
iniciar		25	68,75	60,50	16,95		0,678	
acréc.					10,1	27,05	1,08	60
acréc.					0,9	27,95	1,12	82

ANEXO D

TABELA DE MATERIAIS - CONCRETO C-ART!00 (CP II E 32 Cauê)

	α	cimento	areia	B-1	água	águas	a/c	slump
12/05/2006	Traço Normal - Traço Adicional –Traço B					S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	1,95	2,92			0,54	
iniciar		20,00	39,00	58,40	10,80		0,54	85
	α	cimento	areia	ART	água	águas	a/c	slump
12/05/2006	Traço Normal - Traço Adicional –Traço C					S - 80 ± 20 mm		
	50	1	1,95	1,88	10,80		0,54	
iniciar	50	20,00	39,00	37,60	3,29+0,65			43
acréc.					0,50			63
acréc.	Aditivo	200 ml	(1%)		0,30			73
acréc.					0,20	15,74	0,787	80
15/05/2006	Traço Normal - Traço Adicional –Traço D					S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	1,95	1,88			0,54	
iniciar		20,00	39,00	37,60	10,80		0,54	
acréc					2+1			
acréc	Aditivo	200 ml	(1%)		1+0,66			55
acréc					0,35			76
acréc					0,34	16,15	0,808	76
15/05/2006	Traço Normal - Traço Adicional –Traço E					S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	1,95	1,88	10,80		0,54	
iniciar		20,00	39,00	37,60	7,56		0,678	
acréc.					5,26+1,08			
acréc.	Aditivo	200 ml	(1%)		1,08			45
acréc.					1,08	16,06	0,80	95

ANEXO E

TABELA DE MATERIAIS - CONCRETO C-ART!00 (CP II E 32 Cauê)

	α	cimento	areia	ART	água	águas	a/c	slump
24/05/2006	Traço Normal - Traço Adicional –Traço F						S - 80 ± 20 mm	
Traço	50	1	1,95	1,88			0,545	
iniciar		27,6	58,50	56,40	16,35		0,545	
acréc.		2,4			7,90			
acréc.	8%	finos	(2,4kg)		0,50			
acréc.					0,15			58
acréc.					0,50			68
acréc.					0,30	25,70		85
Total	50	30,00	58,50	56,40		25,70		

24/05/2006	Traço Normal - Traço Adicional –Traço G						S - 80 ± 20 mm	
Traço	50	1	1,95	1,88			0,545	
iniciar		30,00	58,50	56,40	16,35			
acréc		1,32			7,90			
acréc		0,61			0,65			70
acréc					0,33	25,23	0,79	74
Total		31,61	58,50	56,40		25,23	0,79	

Descontar ABS ART/ 7,90 → 25,23 – 7,90 = 17,33 kg (água) a/c – 0,543

Adicionou – 1,32 kg + 0,61 kg cimento

Acréscimo de água – 330 ml

ANEXO F

TABELA DE MATERIAIS - CONCRETO C-ART50 (CP II E 32 Cauê)

	α	cimento	areia	B1	ART	águas	a/c	slump
08/03/2006 – Traço Normal						S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	1,95	1,46	0,94		0,545	
iniciar		30,00	58,50	43,80	28,20	16,35	0,545	
acréc.						20,35	0,68	90
iniciar		30,00	58,50	43,80	28,20	16,35	0,545	
acréc.						18,85		35
acréc.						19,85	0,66	78
10/03/2006 - Traço Rico						S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	1,25	1,125	0,73		0,40	
iniciar		35	43,75	39,375	25,55	14,00	0,40	
acréc						17,42	0,50	78
iniciar		35	43,75	39,375	25,55	14,00	0,40	
acréc						17,42		
acréc						18,42	0,53	78
14/03/2006 - Traço Pobre						S - 80 ± 20 mm		
Traço	50	1	2,75	1,875	1,21		0,678	
iniciar		25	68,75	46,875	30,25	16,95	0,678	
acréc.						21,45		40
acréc.						22,05		70
						22,45	0,90	85
iniciar		25	68,75	46,875	30,25	16,95	0,678	
acréc.						21,95	0,88	90