



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE CONCRETO LEVE ESTRUTURAL CONTENDO AGREGADOS DE TIJOLOS CERÂMICOS

Mayara Amario

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Ana Catarina Jorge Evangelista

Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

Abril 2013

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE CONCRETO LEVE ESTRUTURAL CONTENDO AGREGADOS DE TIJOLOS CERÂMICOS

Mayara Amario

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof.^a Ana Catarina Jorge Evangelista, D. Sc.

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D. Sc.

Eng.^a Luciane Farias Ribas, M. Sc.

Arqt. Thiago Melo Grabois, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL de 2013

Amario, Mayara

Caracterização física e mecânica de concreto leve estrutural contendo agregados de tijolos cerâmicos / Mayara Amario. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

XIV, 69 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Ana Catarina Jorge Evangelista

Romildo Dias Toledo Filho

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 65 – 69.

1. Concreto reciclado. 2. Concreto leve estrutural. 3. Agregado de RCD. 4. Caracterização experimental. I. Evangelista, Ana Catarina Jorge; Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo.

Agradeço aos meus pais, Mayer e Magda, pelo amor, carinho e apoio dedicados para que eu chegasse até esta etapa da minha vida. À minha irmã Michelle, pela convivência e amizade durante todo o tempo. Aos meus familiares, em especial à minha avó Íris que sempre esteve pronta para tudo que fosse preciso. E àqueles que não estão mais entre nós.

Sou particularmente grata ao João Moreno por todo amor, carinho, atenção, paciência e companheirismo que contribuíram muito para a conclusão deste trabalho.

Aos meus orientadores, Ana Catarina e Romildo, pelo apoio, incentivo e confiança durante este trabalho.

Um agradecimento especial ao Thiago Grabois e ao Marco Antônio por tudo que me ensinaram e ajudaram durante a realização dos ensaios.

Aos amigos da graduação, que muito colaboraram com o companheirismo e trocas de ideias, e também pelos momentos de descontração que passamos juntos. Em especial Carol, João Gabriel e Raphael por participarem intensamente da minha vida durante estes 5 anos. Aos também sempre presentes, Raisa, Mieka, Buba, Lívia, Luis, Thiago, Lais, Vitor, Bruno, Suelen, César, Gabriel Maia, Gabriel Alvarenga, Diogo e Daniel.

A todos os funcionários do Laboratório de Estruturas por toda cooperação e ajuda durante a realização dos ensaios. Em especial aos incansáveis e prestativos Clodoaldo e Alessandro que estiveram dispostos a me ajudar toda vez que precisei. Aos também presentes, Júlio, Flávio, Rodrigo, Renan, Adailton, Sandra, Luzidelle e Paulinho.

A todos os amigos e funcionários do Laboratório Central de Pavimentação BR, da Petrobrás Distribuidora, pela colaboração e apoio durante todas as atividades realizadas neste um ano e meio de estágio. Em especial, aos Engenheiros Ricardo e Alex por toda atenção e dedicação. Aos também sempre presentes, Herrmann, Tonial, Junqueira, Fábio, Patrícia, Romildo, Ruy, Perrut e Lenilcio.

A todos que contribuíram de alguma forma para esta realização.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Caracterização física e mecânica de concreto leve estrutural contendo agregados de tijolos cerâmicos

Mayara Amario

Abril/2013

Orientadores: Ana Catarina Jorge Evangelista
Romildo Dias Toledo Filho

Curso: Engenharia Civil

No presente trabalho foram desenvolvidos concretos leves estruturais com a utilização de agregados reciclados de resíduos produzidos em laboratório, provenientes de tijolos maciços cerâmicos. Pesquisas anteriores garantem que a massa específica do concreto reciclado fica no limite entre o concreto leve e o concreto convencional, devido à elevada porosidade do agregado reciclado. Assim, com base em dosagens de concretos leves disponíveis na literatura, foram desenvolvidas duas misturas, uma contendo apenas agregados graúdos reciclados (CRTB 1000) e outra com agregados graúdos e miúdos reciclados (CRTB 7030). É importante ressaltar que não foram utilizados agregados leves neste estudo, sendo o alto teor de vazios do concreto e a grande porosidade dos agregados reciclados os responsáveis por reduzir a massa específica do concreto. A influência do uso de agregados reciclados foi avaliada através de ensaios de trabalhabilidade (no estado fresco) e absorção, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração direta (no estado endurecido), comparando os resultados obtidos com as dosagens de concreto leve utilizadas como base para o estudo. Os resultados demonstraram que é possível produzir concretos leves estruturais com agregados reciclados de resíduos cerâmicos.

Palavras-chave: Resíduo de Construção e Demolição, Concreto Leve, Resíduo Cerâmico; Agregados, Sustentabilidade.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Physical and mechanical characterization of structural lightweight concrete containing aggregates of ceramic bricks

Mayara Amario

April/2013

Advisors: Ana Catarina Jorge Evangelista
Romildo Dias Toledo Filho

Course: Civil Engineering

In the present work, lightweight structural concrete have been developed with the use of recycled aggregates of waste produced in the laboratory from solid ceramic bricks. Previous research ensures that the specific gravity of the recycled concrete is in the boundary between conventional concrete and lightweight concrete, because of the high porosity of recycled aggregate. Thus, based on actual measurements of available lightweight structural concrete in the literature, two mixtures have been developed, one containing only recycled coarse aggregates (CRTB 1000) and one with recycled coarse and fine aggregates (CRTB 7030). It is important to highlight that lightweight aggregates were not used in this study, so that the high void content of concrete and the large porosity of recycled aggregates are responsible for reducing the specific gravity of concrete. The influence of using recycled aggregates was evaluated by tests of workability (fresh state) and absorption, void ratio, specific gravity, compressive strength, elastic modulus and tensile strength directly (in the hardened state), comparing the results obtained with the dosages of lightweight concrete used as a basis for the study. The results have showed that it is possible to produce lightweight structural concrete with recycled aggregates ceramic waste.

Keywords: Construction and Demolition Waste, Lightweight Concrete, Ceramic Residue, Aggregates, Sustainability.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Apresentação do tema.....	1
1.2. Justificativa.....	3
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Metodologia aplicada.....	5
1.5. Estruturação do trabalho.....	5
2. RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD).....	7
2.1. Definição, origem e classificação.....	7
2.2. Composição dos RCD.....	9
2.3. Impacto ambiental causado pelo resíduo de construção e demolição.....	11
2.4. Beneficiamento do resíduo de construção.....	11
2.4.1. Usinas de reciclagem no país.....	12
2.4.2. Equipamentos de britagem.....	13
2.5. Uso dos agregados de RCD reciclados em concretos.....	14
2.5.1. Propriedades de agregados reciclados de RCD.....	14
2.5.2. Propriedades do concreto reciclado de RCD.....	16
3. CONCRETO LEVE.....	20
3.1. Definição.....	20
3.2. Histórico.....	21
3.3. Agregados leves.....	23
3.4. Propriedades do concreto leve.....	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1. Programa experimental.....	28
4.2. Produção do agregado reciclado.....	28

4.3.	Métodos de ensaios.....	30
4.3.1.	Composição granulométrica.....	30
4.3.2.	Massa específica e absorção total	30
4.3.3.	Índice de forma	32
4.3.4.	Equivalente de areia.....	32
4.3.5.	Abatimento e espalhamento do tronco de cone.....	33
4.3.6.	Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto endurecido.....	33
4.3.7.	Resistência à compressão e módulo de elasticidade	34
4.3.8.	Resistência à tração direta.....	36
4.4.	Caracterização dos materiais	37
4.4.1.	Materiais Cimentícios	37
4.4.2.	Agregados.....	39
4.4.3.	Aditivo químico – Superplastificante	43
4.4.4.	Água.....	44
4.5.	Metodologia de produção dos concretos	45
4.5.1.	Dosagem dos concretos.....	45
4.5.2.	Produção dos concretos.....	47
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO	50
5.1.	Abatimento e espalhamento do tronco de cone	50
5.2.	Absorção de água, índice de vazios e massa específica	52
5.3.	Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	54
5.4.	Resistência à tração direta	60
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
6.1.	Conclusões.....	62
6.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição das cargas coletadas por todas as empresas nos meses julho, setembro e outubro de 2005 em Passo Fundo (BERNARDES <i>et al.</i> , 2008).....	9
Figura 2 - Usinas de reciclagem de RCD classe A inauguradas ao longo dos anos (MIRANDA, ÂNGULO E CARELI, 2009).....	12
Figura 3 - Domo do Panteão de Roma: (a) corte do panteão; e (b) o interior do panteão no século XVIII - pintura de Giovanni Panini. (Fonte: Wikipédia <i>apud</i> GRABOIS, 2012)	21
Figura 4 - Edifício da Southwestern Bell Telephone Company, em Kansas, nos Estados Unidos (ESCSI,1971).....	22
Figura 5 - Hotel Chase-Park Plaza, na cidade de St. Louis, nos Estados Unidos (ESCSI,1971)	22
Figura 6 - Espectro dos agregados leves (Adaptado de Litvin, A.; Fiorato, A. E., <i>Concr. Int.</i> , v. 3, n. 3, p.49, 1981) (MEHTA e MONTEIRO, 2008).....	24
Figura 7 - (a) concreto com segregação dos grãos de argila expandida em comparação com (b) onde não ocorreu segregação (COLEPARDI <i>et al.</i> , 2004 <i>apud</i> GRABOIS, 2012)	26
Figura 8 - Tijolos cerâmicos maciços	29
Figura 9 - Britador de mandíbulas QUEIXADA 200.....	29
Figura 10 - Aparato utilizado para ensaio de massa específica e absorção para os agregados leves (GRABOIS, 2012)	31
Figura 11 - Configuração do ensaio de resistência à compressão (GRABOIS, 2012) .	35
Figura 12 - Ensaio de resistência à tração direta: (a) moldes com redutores de seção (VELASCO, 2008 <i>apud</i> GRABOIS, 2012); (b) dimensões das amostras em mm (VELASCO, 2008 <i>apud</i> GRABOIS, 2012); (c) Configuração dos LVDT's na região central da amostra (GRABOIS, 2012); e (d) amostras após o ensaio realizado (GRABOIS, 2012).....	36
Figura 13 - Cimento Portland CPV – ARI.....	37
Figura 14 - Cinza volante.....	38
Figura 15 - Curvas granulométricas do cimento Portland e cinza volante (GRABOIS, 2012)	39

Figura 16 - Areia natural quartzosa.....	40
Figura 17 - Curvas granulométricas dos agregados leves e natural (GRABOIS, 2012)	41
Figura 18 - (a) Percentual de absorção dos agregados leves miúdo (AE0500) e graúdo (AE1506); (b) ampliação, no detalhe, dos 35 minutos iniciais de ensaio (GRABOIS, 2012)	41
Figura 19 - (a) Fração graúda de tijolo britado (TBg); (b) Fração miúda de tijolo britado (TBf)	42
Figura 20 - Curva granulométrica dos agregados reciclados	43
Figura 21 - (a) Percentual de absorção do agregado graúdo reciclado; (b) ampliação dos 35 minutos iniciais de ensaio	43
Figura 22 - Superplastificante Glenium 160 SCC.....	44
Figura 23 - Betoneira CSM CS 145L.....	47
Figura 24 - Sequência do processo de mistura do concreto reciclado: (a) lançamento dos agregados na condição seca; (b) agregados após 1 minuto de mistura; (c) agregados misturados com 50% da água total da mistura; (d) adição dos materiais cimentícios; (e) mistura após homogeneização dos materiais cimentícios; (f) aspecto final da mistura após adição do restante da água e todo superplastificante.....	49
Figura 25 - Ensaio de abatimento e espalhamento de tronco do cone para as misturas: (a) CLAA 1000 (GRABOIS, 2012); (b) CLAA 7030 (GRABOIS, 2012); (c) CRTB 1000; e (d) CRTB 7030.	51
Figura 26 – Seções transversais dos corpos-de-prova, divididos em topo, meio e base das misturas: (a) CLAA 1000 (GRABOIS, 2012); (b) CLAA 7030 (GRABOIS, 2012); (c) CRTB 1000; e (d) CRTB 7030.	53
Figura 27 – Seção longitudinal dos corpos-de-prova cilíndricos das misturas: (a) CRTB 1000; e (b) CRTB 7030.....	54
Figura 28 – Curvas típicas tensão <i>versus</i> deformação aos 28 dias, (a) CLAA 1000 e CLAA 7030 (GRABOIS, 2012); (b) CAA 40 (GRABOIS, 2012).	56
Figura 29 - Curvas típicas tensão <i>versus</i> deformação aos 28 dias dos concretos reciclados CRTB 1000 E CRTB 7030.	56
Figura 30 - Evolução da resistência à compressão dos concretos ao longo do tempo	57
Figura 31 - Valores de fator de eficiência dos concretos aos 28 dias de cura.	59

Figura 32 - Modo de ruptura dos concretos reciclados, exemplificado pelo CRTB 1000	59
Figura 33 - Curvas típicas de tensão versus deformação dos concretos leves: (a) CLAA 1000 (GRABOIS, 2012); (b) CLAA 7030 (GRABOIS, 2012).....	60
Figura 34 - Curvas típicas de tensão versus deformação dos concretos reciclados: (a) CRTB 1000; (b) CRTB 7030.	61
Figura 35 – (a) e (b) Modo de ruptura dos concretos reciclados, exemplificado pelo CRTB 7030.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e caracterização dos resíduos provenientes dos RCD em Passo Fundo (15 cargas analisadas) (BERNARDES <i>et al.</i> , 2008)	10
Tabela 2 - Valores de referência da massa específica dos concretos leves estruturais (ROSSIGNOLO, 2009)	20
Tabela 3 - Tipo de regularização das bases dos corpos-de-prova	34
Tabela 4 - Composição química, propriedades físicas e diâmetro das partículas do cimento Portland e da cinza volante adotados (GRABOIS, 2012).....	38
Tabela 5 - Propriedades físicas e granulométricas dos agregados leves e natural (GRABOIS, 2012)	40
Tabela 6 - Propriedades físicas e granulométricas dos agregados reciclados	42
Tabela 7 - Propriedades do aditivo superplastificante (www.basf.com.br).....	44
Tabela 8 - Composição dos concretos em kg/m ³	46
Tabela 9 - Relação entre o volume dos materiais constituintes e o volume de material cimentício	46
Tabela 10 - Composição da mistura CAA 40 em kg/m ³	47
Tabela 11 - Abatimento e espalhamento do tronco de cone dos concretos	50
Tabela 12 – Valores médios de índice de vazios, absorção total de água e massa específica dos concretos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	52
Tabela 13 - Valores médios das propriedades mecânicas sob esforços de compressão dos concretos aos 28 dias, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	55
Tabela 14 - Valores médios de resistência à compressão dos concretos à 1, 3, 7 e 28 dias de cura com os respectivos coeficientes de variação (em %).....	57
Tabela 15 - Valores médios de resistência à compressão, massa específica e o fator de eficiência dos concretos aos 28 dias.....	58
Tabela 16 - Valores médios das propriedades mecânicas sob esforços de tração direta dos concretos aos 28 dias, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).....	60

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Absorção de água
a/c	Relação água/cimento
a/mc	Relação água/material cimentício
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AEf	Argila expandida fina
AEg	Argila expandida graúda
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAA	Concreto autoadensável
CLAA	Concreto leve autoadensável
CLE	Concreto leve estrutural
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
CRTB	Concreto reciclado de tijolo britado
D	Diâmetro do corpo-de-prova
D ₁₀	Tamanho abaixo do qual se encontra 10% da massa de material
D ₃₀	Tamanho abaixo do qual se encontra 30% da massa de material
D ₅₀	Tamanho abaixo do qual se encontra 50% da massa de material
D ₆₀	Tamanho abaixo do qual se encontra 60% da massa de material
D ₈₀	Tamanho abaixo do qual se encontra 80% da massa de material
D ₉₀	Tamanho abaixo do qual se encontra 90% da massa de material
E	Módulo de elasticidade na compressão
ESCSI	Expanded Shale, Clay and Slate Institute
E _t	Módulo de elasticidade na tração direta
f _c	Resistência à compressão
FE	Fator de eficiência
h	Altura

I_v	Índice de vazios
LABEST	Laboratório de Estruturas – COPPE/UFRJ
LAMAC	Laboratório de Materiais de Construção
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i>
m_i	Massa da amostra saturada imersa em água
m_s	Massa da amostra seca em estufa
m_{sat}	Massa da amostra saturada em água
NBR	Norma Brasileira Registrada
P_{1ef}	Carga de primeira fissura
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SCC	<i>Selfcompacting concrete</i>
SP	Superplastificante
TB_f	Tijolo britado fino
TB_g	Tijolo britado graúdo
VMA	<i>Viscosity Modifier Agent</i> (Agente modificador de viscosidade)
γ	Massa específica aparente
ϵ_t	Deformação referente à carga última (tração direta)
ϵ_u	Deformação referente à carga última (compressão)
ρ_r	Massa específica real
ρ_s	Massa específica seca
ρ_{sat}	Massa específica saturada
σ_{1ef}	Tensão de primeira fissura
μ	Viscosidade plástica

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do tema

A construção civil é uma atividade primitiva, onde desde a pré-história já se utilizavam fontes de energia e recursos naturais para construção de casas e pontes. Mas somente a partir do final do século XX é que as questões ambientais passaram a ser objeto de maiores preocupações pela humanidade (MENEZES *et al.* , 2011).

Os impactos ambientais associados à construção ocorrem em toda a cadeia construtiva, desde a extração de matérias-primas, à concepção das construções, seu uso e manutenção até a sua demolição (HELPA E SOARES, 2011 *apud* ALVES, 2012). O volume de resíduos de construção e demolição (RCD) equivale a mais da metade dos resíduos sólidos urbanos, e a maior parte deles é depositada irregularmente sem qualquer forma de segregação. Esse volume e essa deposição irregular causam o esgotamento prematuro de áreas de disposição final de resíduos, a obstrução de sistemas de drenagem urbana, a degradação de mananciais, a sujeira nas vias públicas, a proliferação de insetos, roedores e outros organismos vetores de doenças (SANTIAGO, 2008).

Todos estes fatores levam à busca de alternativas para minimizar o impacto gerado pela indústria da construção. A limitação das perdas de materiais se apresenta como a primeira alternativa para sanar o problema da geração de resíduos de construção. Tal solução aparece como boa alternativa para uma utilização mais racional de recursos, redução nos custos dos empreendimentos e redução nos custos de gerenciamento dos resíduos que são ocasionados pelas edificações, seja na fase de construção ou utilização (LEITE, 2001).

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

A reciclagem é, sem dúvida, a melhor alternativa para reduzir o impacto que o ambiente pode sofrer com o consumo de matéria prima e a geração desordenada de resíduos. Nos últimos anos, a reciclagem de resíduos tem sido incentivada em todo o mundo por questões políticas, econômicas ou ecológicas. A reciclagem de resíduos de construção irá minimizar também os problemas com o gerenciamento dos resíduos sólidos dos municípios. Haverá um crescimento da vida útil dos aterros, diminuição dos pontos de descarte clandestinos e redução dos custos de gerenciamento de resíduos (LEITE, 2001).

A incorporação de resíduos na forma de agregados reciclados para a produção de concretos apresenta-se como alternativa de reciclagem viável, uma vez que os agregados ocupam cerca de 70% a 80% do volume total do concreto. Além disso, o volume de concreto produzido anualmente é bastante significativo. No caso dos concretos produzidos com agregados leves, há outro agravante: além de consumir matéria-prima, os agregados leves consomem grande quantidade de energia no seu processo de obtenção. Desse modo, é interessante viabilizar o uso de agregados reciclados para a produção destes concretos (SANTIAGO, 2008).

Devido à composição do resíduo de construção e demolição ser constituída por materiais mais porosos, tanto a sua massa específica quanto sua massa unitária tendem a ser menores que as apresentadas por agregados naturais. Reciclados de concreto apresentam massa específica maior que os de alvenaria e a parcela graúda de reciclados de concreto apresentam menor diferença com relação ao agregado convencional que a parcela miúda, devido ao menor teor de argamassa aderida (LIMA, 1999).

A massa específica do concreto reciclado fresco tende a ser menor que a do concreto convencional devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado e por uma quantidade maior de vazios incorporada ao concreto com este material. Esta influência do agregado reciclado sobre a massa específica do concreto acaba conferindo-lhe valores tais que o concreto produzido fica situado no limite entre o concreto leve e o convencional (LATTERZA e MACHADO Jr., 1999 apud LEITE, 2001).

Considera-se, então, que conhecer a composição e outras propriedades dos agregados reciclados de RCD constitui um primeiro passo para se poder avaliar o desempenho do produto produzido a partir desses resíduos. Pois, a partir de suas composições e demais propriedades, é possível determinar de forma adequada a

influência da composição e dessas propriedades no desempenho do produto reciclado (ÂNGULO, 2000).

1.2. Justificativa

A indústria da construção civil sempre foi caracterizada pela carência de qualidade em seus produtos e por uma filosofia altamente esbanjadora. Embora os administradores do setor tenham por dever sempre otimizar recursos e, portanto, minimizar perdas, os resíduos produzidos pela construção nem sempre foram considerados uma variável importante na equação dos orçamentos. Tanto no Brasil como em outros países, tais resultados sempre acabaram influenciando no custo da construção (ZORDAN, 1997).

Segundo Pinto (1999), para os resíduos de construção e demolição há agravantes em relação aos outros tipos de resíduos urbanos, como o profundo desconhecimento dos volumes gerados, dos impactos que eles causam, dos custos sociais envolvidos e, inclusive, das possibilidades de seu reaproveitamento. Esses agravantes fazem com que os gestores dos resíduos se apercebam da gravidade da situação unicamente nos momentos em que veem a ineficácia de suas ações corretivas.

Além disso, percebe-se uma menor preocupação com os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em relação aos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por acreditar-se erroneamente que os resíduos de construção e demolição possuem pouca toxicidade. Entretanto, embora estes resíduos sejam considerados inertes pela NBR 10.004 (ABNT, 1987), componentes orgânicos como plásticos, tintas, óleos, asfaltos, madeiras, e ainda, materiais de pintura, substâncias de tratamento de superfícies, amianto e metais pesados, presentes nestes resíduos, podem contaminar o solo devido à lixiviação ou solubilização de certas substâncias nocivas e colocar em risco a saúde das pessoas (ÂNGULO; JOHN, 2002; LEITE, 2001 *apud* CARRIJO, 2005).

No Brasil, a indústria da construção civil gera, aproximadamente, 65 milhões de toneladas de resíduos anualmente. Desse montante, estima-se que apenas 5% são reciclados ou reutilizados (CAPELLO, 2006).

Embora ainda não exista estatísticas em todo o país, na média, o entulho que sai dos canteiros de obra brasileiros é composto basicamente por 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação (tijolos e blocos) e 6% de outros materiais (concreto, areia, metálicos e plásticos) (CAMARGO, 1995). Portanto, é possível triturar mais de 90% dos RCD (argamassa e componentes de vedação) para serem usados como agregados na produção de componentes de construção e argamassas (ALVES, 2011).

Contudo, Evangelista *et al.* (2006) afirmam que a reutilização de um resíduo não deve ser feita em torno de ideias preconcebidas, mas em função das características do resíduo. Em geral, tais aplicações são aquelas que melhor aproveitam suas características físico-químicas com menor impacto ambiental dentro de um segmento de mercado específico, no qual o produto reciclado tem boas condições de competição em relação ao produto convencional.

De acordo com Lima (1999), os agregados reciclados apresentam, em sua maioria, massas específicas e unitárias menores que os agregados naturais. Mesmo reciclados de concreto estrutural seguem esta tendência. Isto se explica em parte pelo fato dos resíduos de construção serem compostos de materiais porosos. Isto se reflete nas massas específicas de argamassas e concretos elaborados com o material, que também são menores que as de argamassas e concretos convencionais. Assim, a massa específica do concreto reciclado tende a ser menor que a do concreto convencional devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado.

A incorporação de resíduos, na forma de agregados reciclados, para a produção de concretos apresenta-se como alternativa de reciclagem viável, uma vez que os agregados ocupam cerca de 70% a 80% do volume total do concreto. Além disso, o volume de concreto produzido anualmente é bastante significativo. No caso dos concretos produzidos com agregados leves há outro agravante, além de consumir matéria-prima, os agregados leves consomem grande quantidade de energia no seu processo de obtenção. Desse modo, é interessante viabilizar o uso de agregados reciclados para a produção destes concretos (SANTIAGO, 2008).

Desta forma, este estudo visa contribuir com um aumento no conhecimento sobre as propriedades dos agregados reciclados e sua influência no comportamento mecânico dos concretos produzidos com agregados graúdos e miúdos provenientes de resíduos de construção e demolição. Além disso, é de grande importância do ponto de vista da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável, que seja possível produzir um concreto estrutural com baixa massa específica, próxima a dos concretos leves, com um material reciclado, reduzindo o impacto causado ao meio ambiente através da diminuição do consumo de recursos naturais e de energia para a produção de agregados leves.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a utilização de agregados produzidos a partir de resíduos cerâmicos provenientes da construção civil como substituto total ou parcial do agregado natural para a produção de concretos leves estruturais. Para isso, foram realizados ensaios reológicos (abatimento e espalhamento de tronco de cone), físicos (absorção total, índice de vazios e massa específica seca) e mecânicos (resistência à compressão e resistência à tração direta).

Para atingir o objetivo principal, foram utilizados traços disponíveis na literatura e ajustados experimentalmente. Nesses traços, utilizavam-se agregados de argila expandida para o desenvolvimento de concreto leve estrutural e, neste trabalho, toda a fração de agregado leve foi substituída por agregado reciclado.

Assim, tem-se como objetivo específico avaliar e comparar as propriedades físicas e mecânicas dos concretos reciclados desse estudo com os concretos leves produzidos a partir das dosagens disponíveis na literatura.

1.4. Metodologia aplicada

O estudo faz parte de uma pesquisa de Iniciação Científica no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, com o objetivo de elaborar um Projeto de Graduação, para a conclusão do curso de Engenharia Civil.

O trabalho foi dividido em duas etapas, onde a primeira representou uma revisão da literatura através de artigos, teses, revistas e livros sobre estudos e debates recentes a respeito do assunto, e a segunda englobou a parte experimental, composta pela produção e caracterização tanto dos agregados quanto do concreto.

O programa experimental foi constituído pela caracterização dos agregados reciclados e determinação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos.

1.5. Estruturação do trabalho

Esta monografia está dividida em 6 capítulos, sendo que o capítulo 1 apresenta uma breve introdução ao tema, abordando questões relativas à justificativa, objetivos, metodologia aplicada e estruturação do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica sobre os resíduos de construção e demolição, abordando assuntos relativos à composição dos resíduos, impactos gerados pela destinação inadequada, formas de beneficiamento do RCD e propriedades dos agregados e concretos reciclados.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento de concretos leves, expondo definições importantes e o histórico do que já foi desenvolvido sobre do assunto. Este capítulo ainda descreve as principais propriedades de concretos leves e os tipos de agregados mais utilizados.

O capítulo 4 descreve o procedimento empregado para a caracterização dos materiais a serem utilizados, assim como os ensaios para avaliar as propriedades dos concretos produzidos. Esse capítulo apresenta também o procedimento aplicado para a produção do agregado reciclado, bem como detalhes sobre a dosagem e produção dos concretos.

O capítulo 5 apresenta os resultados dos ensaios realizados nos concretos tanto em seu estado fresco, como na forma endurecida, além da discussão e análise dos resultados obtidos.

O capítulo 6 engloba as conclusões do estudo apresentado, avaliando se os objetivos foram atingidos e apontando também sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento desse trabalho.

2. RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

2.1. Definição, origem e classificação

Segundo Angulo (2000), Ferraz et al.(2001), EC (2000), Wilson (1996), Schultmann e Rentz (2000) *apud* Angulo (2005), Resíduos de Construção e Demolição são considerados todo e qualquer resíduo oriundo das atividades de construção, sejam eles de novas construções, reformas, demolições, que envolvam atividades de obras de arte e limpezas de terrenos com presença de solos ou vegetação.

De forma mais simplificada, este material pode ser definido como um resíduo proveniente de construções, reparos, reformas, e demolições de estruturas e estradas (LEITE, 2001).

Eles são compostos por restos e fragmentos de tijolos cerâmicos, madeira, concreto, vidro, gesso, aço, plástico, papel, entre outros materiais que fazem parte de um edifício ou restos de embalagens utilizadas durante a execução da obra.

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

Para que um resíduo tenha uma correta destinação, a ABNT NBR 10004:2004 – “Resíduos sólidos – Classificação” - classifica os resíduos, do ponto de vista do risco ambiental, nos seguintes tipos:

- a) Classe I – Perigosos: são aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública por meio do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

- b) Classe II – Não perigosos:
 - resíduos classe II A – Não inertes: resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações dos outros resíduos.

 - resíduos classe II B – Inertes: quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um

contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002 classifica os diversos tipos de resíduos da construção civil em quatro tipos:

- a) Classe A: são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
- de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- b) Classe B: são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
- c) Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- d) Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

A NBR 15116 (2004) classifica os resíduos sólidos de construção civil de classe A, definida pela CONAMA 307 de 05 de julho de 2002, em Agregados de Resíduo de Concreto (ARC) e Agregados de Resíduo Misto (ARM). O ARC é composto de, no mínimo, 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, enquanto o ARM é composto de até 90% em massa destes tipos de fragmentos.

Outra classificação, segundo Ricci (2007), é feita nas usinas de reciclagem, onde os agregados reciclados e o RCD são classificados pela cor da seguinte forma: cinza (visualmente observa-se a predominância de componentes de natureza cimentícia) e o vermelho (visualmente observa-se a predominância de componentes de natureza cerâmica).

2.2. Composição dos RCD

Quando se estuda a composição média dos resíduos de construção, devem ser considerados fatores como a tipologia construtiva utilizada, as técnicas construtivas existentes, os materiais disponíveis em cada local. Dentro deste contexto, ainda merecem interesse os índices de perdas de materiais mais significativos. Todos estes fatores estarão atrelados à composição do resíduo de construção e demolição (LEITE, 2001).

No Brasil, Lucena (2005) *apud* Bernardes *et al.* (2008) constatou que os resíduos de construção civil são compostos, principalmente, de tijolos, areias e argamassas (em torno de 80%). Numa menor proporção foram encontrados ainda restos de concreto (9%), pedras (6%), cerâmica (3%), gesso (2%) e madeira (1%).

De acordo com Bernardes *et al.* (2008), que analisou a composição do resíduo coletado por quatro empresas licenciadas no município de Passo Fundo, região norte do estado do Rio Grande do Sul, 42,5% da carga coletadas é proveniente de demolições e reformas enquanto que 11,1% é gerado por prédios em construção. Os dados estudados nessa pesquisa estão apresentados na Figura 1.



Figura 1 - Composição das cargas coletadas por todas as empresas nos meses julho, setembro e outubro de 2005 em Passo Fundo (BERNARDES *et al.*, 2008)

Ainda nesse estudo, Bernardes *et al.* (2008) separou e classificou os resíduos coletados de acordo com a Resolução no 307 do CONAMA. Na Tabela 1 são apresentados os resultados desse estudo. Dos 14 tipos de RCD identificados, os que representaram os maiores percentuais foram os provenientes de argamassa e tijolos,

que, somados, chegaram a aproximadamente 76% dos resíduos coletados; esses resíduos, classificados como Classe A, remetem à importância da implantação do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção para o município de Passo Fundo, pois, na sua totalidade, são passíveis de reaproveitamento e reciclagem, diminuindo as áreas de disposição final e, assim, causando menor impacto ao meio ambiente (BERNARDES *et al.*, 2008).

Tabela 1 - Classificação e caracterização dos resíduos provenientes dos RCD em Passo Fundo (15 cargas analisadas) (BERNARDES *et al.*, 2008)

Resíduos	Massa em kg	%	Classificação
Argamassa	13.930,8	29,7	A
Cerâmica	1.327,1	2,8	A
Concreto	6.489,6	13,8	A
Finos argamassa	3.617,8	7,7	A
Finos de tijolos	891,0	1,9	A
Gesso	1.141,7	2,4	C
Madeira	974,0	2,1	B
Matéria orgânica, galhos	45,8	0,1	B
Material retido (argamassa + tijolos)	5.925,1	12,6	A
Metal	143,5	0,3	B
Papel, plásticos, tecido, isopor, PVC	273,4	0,6	B
Pedras	499,7	1,1	A
Terra bruta	350,5	0,7	A
Tijolo	11.323,5	24,1	A
Totais	46.933,4	100,0	

Bernardes (2008) salienta que não foram identificados resíduos Classe D, o que, de certa forma, é um dado que deve ser considerado como anormal, pois sempre há resíduos de tintas, solventes e amianto, entre outros. Provavelmente, esse fato justifique-se em função da época de realização da pesquisa (julho a outubro) ou de uma separação prévia desse tipo de resíduo ocorrida ainda na obra.

Observa-se também que o resíduo de Classe A representa quase 95% do total coletado, o que significa dizer que praticamente todo o resíduo pode dar origem a agregados com alto potencial de reciclabilidade.

2.3. Impacto ambiental causado pelo resíduo de construção e demolição

O RCD representa de 13 a 67% em massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tanto no Brasil como no exterior, cerca de 2 a 3 vezes a massa de lixo urbano (JOHN, 2000; HENDRIKS, 2000 *apud* ÂNGULO, 2005).

Na grande maioria, os entulhos são lançados em bota-foras clandestinos, nas margens de rios e córregos, em terrenos baldios, nas encostas, em passeios e outras áreas públicas e em áreas protegidas por lei. As consequências são impactos ambientais tais como o assoreamento e entupimento de cursos d'água, associados às constantes enchentes, além de promover o desenvolvimento de vetores nocivos à saúde pública (SALSA, 2009).

De acordo com EPA (1995) *apud* John (2000), devido a sua composição variada, os resíduos de construção e demolição podem conter resíduos perigosos, como adesivos, tintas, óleo, baterias, biocidas incorporados em madeiras tratadas, tendo sido encontrado nos lixiviados dos aterros quantidades de substâncias tóxicas acima dos limites.

Segundo Goldstein (1995) *apud* Leite (2001), a utilização de novos materiais, mais benéficos ao meio ambiente, têm sido tentada. A incorporação de materiais reciclados ao concreto pode ser considerada como uma boa ferramenta para a conservação de energia e de recursos naturais, e para aumentar a vida útil das áreas de disposição de resíduos.

2.4. Beneficiamento do resíduo de construção

De acordo com a resolução nº 307/02 do CONAMA, agregado reciclado é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.

O beneficiamento dos resíduos de construção e demolição envolvem desde a sua coleta e transporte, passando por separação, britagem e peneiramento, até a sua estocagem para posterior utilização. Alguns estudos concluíram que o beneficiamento de resíduo de construção e demolição não difere muito do tratamento dado à produção de agregados naturais, e muitos dos equipamentos utilizados para esses se adequam perfeitamente aos primeiros (LEITE, 2001).

O procedimento básico da reciclagem consiste em britar o resíduo, obtendo agregado nas dimensões desejadas (HANSEN, 1992). Pode-se britar apenas uma vez o resíduo ou realizar mais de uma britagem, para diminuição das dimensões das partículas e para maior controle da granulometria do reciclado. As principais características dos reciclados que são afetadas pelos procedimentos e equipamentos utilizados são: classificação e composição; teor de impurezas; granulometria; forma e resistência dos grãos (LIMA, 1999).

2.4.1. Usinas de reciclagem no país

De acordo com o estudo realizado por Miranda, Angulo e Careli (2009), até o ano de 2002, o país contava com 16 usinas, possuindo uma taxa de crescimento mais reduzida (até três usinas inauguradas por ano). Após a publicação da resolução CONAMA 307 e o exemplo de gestão públicas bem-sucedida de Belo Horizonte, essa taxa de crescimento aumentou (de três a nove usinas instaladas por ano). Atualmente, já podem ser citadas pelo menos 47 usinas de reciclagem, sendo 24 públicas e 23 privadas. Das 36 usinas que estão em operação ou em instalação, 15 são públicas e 21 são privadas. A Figura 2 apresenta o número de usinas de classe A no país.

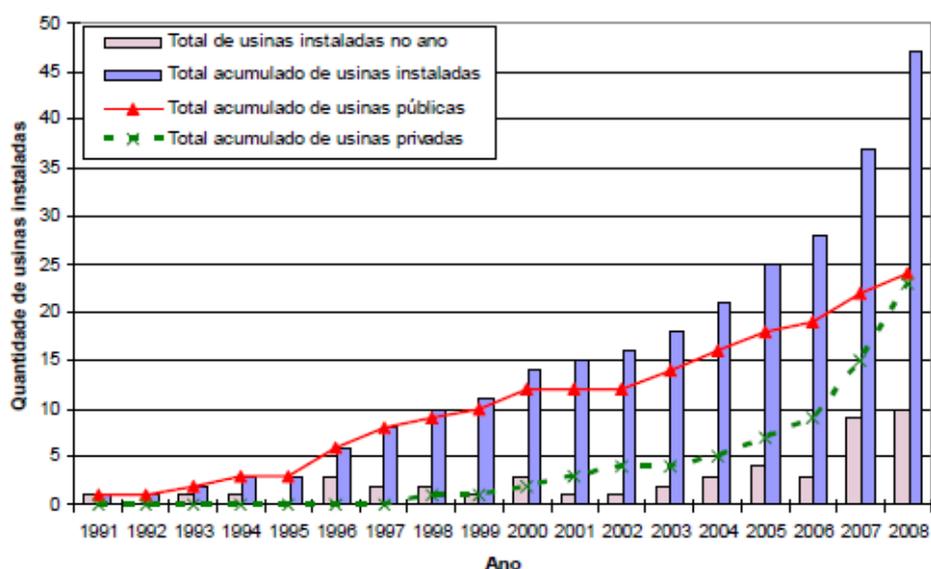


Figura 2 - Usinas de reciclagem de RCD classe A inauguradas ao longo dos anos (MIRANDA, ÂNGULO E CARELI, 2009)

O aumento do número de usinas privadas instaladas decorre da perspectiva dos empresários de ser esta uma boa alternativa de investimento, com baixo investimento de capital e alta taxa de retorno (MIRANDA, ÂNGULO E CARELI, 2009).

Segundo Lima (1999), o local de instalação de uma usina de reciclagem de resíduos de construção e demolição é de fundamental importância para o sucesso do programa de reciclagem. O ideal é que as usinas estejam o mais próximo possível das fontes geradoras e dos locais de uso, ou seja, inseridas no contexto urbano.

Em relação ao processo de reciclagem, quase todas as usinas brasileiras são bem semelhantes. São compostas dos seguintes equipamentos: pá carregadeira ou retroescavadeira, alimentador vibratório, transportadores de correia, britador de mandíbula ou impacto, separador magnético permanente ou eletroímã, e peneira vibratória (MIRANDA, ÂNGULO E CARELI, 2009).

2.4.2. Equipamentos de britagem

a) Britador de impacto

Neste equipamento o resíduo é britado em uma câmara de impacto, pelo choque com martelos maciços fixados a um rotor e pelo choque com placas de impacto fixas. Há britadores de impacto com portes variados, que atendem a várias necessidades, podendo ser utilizados em britagem primária ou secundária (LIMA, 1999).

Leite (2001) destaca algumas de suas vantagens, como:

- Robustez – processa tanto peças de concreto armado, quanto vigas de madeira (LIMA, 1999);
- Alta redução das dimensões das peças britadas. Às vezes dispensa a rebritagem, pois gera uma quantidade de finos razoável (LIMA, 1999; MUELLER E WINKLER, 1998; QUEBAUD, 1996);
- Gera grãos de forma cúbica, com boas características mecânicas (LIMA, 1999; QUEBAUD, 1996; MAULTZSCH E MELLMANN, 1998);
- Baixa emissão de ruído (LIMA, 1999);
- Possui menor sensibilidade aos materiais que não podem ser moídos, como barras de aço (QUEBAUD, 1996; HANSEN, 1992);

Hansen (1992) *apud* Leite (2001) aponta, entretanto, que o britador de impacto apresenta desvantagens devido ao seu alto custo de manutenção, com alto desgaste.

b) Britador de mandíbula

Também muito utilizados na reciclagem, rompem as partículas por compressão (esmagamento). São geralmente utilizados como britadores primários, pois não reduzem muito as dimensões dos grãos, gerando alta porcentagem de graúdos. Em geral o material processado é rebitado (por moinhos de martelos, britadores de mandíbula de menor porte etc.) (LIMA, 1999). Hansen (1992) *apud* Leite (2001) aponta as seguintes vantagens:

- Proporciona distribuição granulométrica dos agregados mais adequada para o uso em concreto;
- Proporciona britagem de apenas uma pequena quantidade do agregado original de concretos a serem reaproveitados;
- Produz apenas 20% de finos abaixo de 4,8 mm;

Leite (2001) destaca como desvantagens a necessidade de uma segunda britagem (LIMA, 1999; QUEBAUD, 1996); peças armadas ou de madeira de maiores dimensões não devem ser britadas neste equipamento, pois geralmente ocorrem quebras do eixo do britador (LIMA, 1999; BRITO FILHO, 1999); alta emissão de ruído (LIMA, 1999); e menor produtividade que os britadores de impacto (PINTO, 1997).

2.5. Uso dos agregados de RCD reciclados em concretos

2.5.1. Propriedades de agregados reciclados de RCD

A necessidade de obtenção de concretos mais duráveis e resistentes tem conduzido a estudos mais aprofundados das propriedades dos agregados. Deste modo, os agregados deixam de ter um papel apenas econômico na composição do concreto, podendo influenciar não só na trabalhabilidade, como também nas suas propriedades físicas, mecânicas e na durabilidade (LEITE, 2001).

a) Absorção de água

Uma das características em que o reciclado mais difere dos agregados convencionais é na absorção de água. Por ser composto por materiais porosos como argamassas, componentes de alvenaria, entre outros, o reciclado apresenta taxas de absorção significativas (mesmo os reciclados de concretos estruturais) (LIMA, 1999).

Segundo Lima (1999), a absorção do reciclado é maior quanto maior for a porosidade dos componentes do resíduo. Assim, agregados obtidos da reciclagem de alvenaria apresentam taxas de absorção maiores que os obtidos da reciclagem de concreto.

A capacidade de absorção de água dos agregados reciclados apresenta ainda a característica de se pronunciar numa velocidade mais rápida que a dos agregados naturais de forma que aquele pode chegar à quase saturação em questão de minutos (TENORIO, 2007).

É importante avaliar a capacidade de absorção do agregado reciclado nos minutos iniciais porque o concreto no estado fresco pode ter grande parte da água da mistura absorvida, diminuindo sua trabalhabilidade.

Devido à maior absorção dos reciclados, vários autores recomendam seu uso na condição saturada, para evitar que o agregado retire água da pasta, necessária para a hidratação e ganho de resistência (HANSEN, 1992; SCHULZ & HENDRICKS, 1992; ANDRADE, 1998; FONSECA, 1998; I&T, 1995; CUR, 1984 *apud* LIMA, 1999).

b) Composição granulométrica

A distribuição granulométrica é importante na determinação de características de argamassas e concretos, influenciando na trabalhabilidade, na resistência mecânica, no consumo de aglomerantes, na absorção de água, na permeabilidade etc. A granulometria dos reciclados varia conforme o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados, a granulometria do resíduo antes de ser processado e outros fatores. Assim, a curva granulométrica é característica específica de cada tipo particular de resíduo reciclado (LIMA, 1999).

De modo geral, a composição granulométrica dos agregados reciclados costuma ser um pouco mais grossa que dos agregados naturais, isso tanto para agregados graúdos quanto para miúdos.

Devem ser tomados cuidados com a composição granulométrica dos agregados reciclados para possibilitar a produção de misturas de concreto trabalháveis, com grau de compacidade satisfatório e que permitam o melhor desempenho técnico e a redução do custo dos concretos produzidos (LEITE, 2001).

c) Massa específica e massa unitária

Devido à composição do resíduo de construção e demolição ser composta por materiais mais porosos, tanto a sua massa específica quanto sua massa unitária tendem a ser menores que as apresentadas por agregados naturais.

Reciclados de concreto apresentam massa específica maior que os de alvenaria e a parcela graúda de reciclados de concreto apresentam menor diferença com relação ao agregado convencional que a parcela miúda, devido ao menor teor de argamassa aderida (LIMA, 1999).

É importante que se conheça tanto a massa específica quanto a massa unitária antes do cálculo da dosagem dos concretos. Por causa da diferença dessas duas propriedades quando se compara agregados convencionais a agregados reciclados, é necessário realizar uma compensação da quantidade de material reciclado a ser utilizado no concreto quando for utilizado como base o traço em massa do concreto convencional.

d) Forma e textura das partículas

Dependendo do tipo de resíduo de construção processado e dos equipamentos utilizados, o reciclado pode apresentar forma mais lamelar e textura mais áspera que os agregados convencionais. Isto se reflete na qualidade de argamassas e concretos preparados com o material. Devido à forma e textura do reciclado, pode ser necessário maior teor de aglomerantes e de água, para que o compósito seja trabalhável. Isto pode aumentar os custos de produção ou prejudicar a qualidade, pelo aumento da relação a/c (LIMA, 1999).

Segundo Leite (2001), sua textura mais rugosa e sua maior angulosidade colaboram com a melhoria da aderência pasta/agregado. O material reciclado possui maior área específica, contribuindo com maior área de aderência entre a argamassa e o agregado. Além disso, o material promove maior absorção da pasta de cimento pelos poros superficiais do agregado, quando comparado ao material natural usualmente empregado.

2.5.2. Propriedades do concreto reciclado de RCD

a) Massa específica

A massa específica do concreto reciclado fresco tende a ser menor que a do concreto convencional devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado e por uma quantidade maior de vazios incorporada ao concreto com este material. Esta influência do agregado reciclado sobre a massa específica do concreto acaba conferindo-lhe valores tais que o concreto produzido fica situado no limite entre o concreto leve e o convencional (LATTERZA e MACHADO Jr., 1999 *apud* LEITE, 2001).

No caso da massa específica do concreto na condição saturado de superfície seca essa diferença tende a diminuir, pois a absorção do concreto com agregado reciclado é maior que a do concreto convencional.

b) Trabalhabilidade

Concretos com reciclados apresentam trabalhabilidade menor que os concretos convencionais de mesmo traço. Este fato está relacionado com a maior porosidade e angularidade que o material reciclado apresenta, ocasionando um aumento na absorção de água e diminuição da água da pasta cimentícia, sendo necessária uma maior quantidade de água livre para se obter a mesma trabalhabilidade.

A utilização de agregados miúdos reciclados parece reduzir ainda mais a trabalhabilidade do concreto. Quando somente agregado graúdo de concreto é usado existe apenas uma pequena diferença na trabalhabilidade do concreto reciclado e do concreto convencional (HANSEN, 1992).

Assim, a trabalhabilidade é uma propriedade muito importante do concreto, que exige um estudo mais aprofundado, de forma a evitar o surgimento de características indesejáveis.

c) Resistência à compressão

Em termos de relação da porosidade com a resistência, pode-se afirmar que o maior limitante da resistência dos concretos reciclados é o agregado reciclado em razão de ele ser o principal responsável pela “introdução de porosidade” no sistema (TENORIO, 2007).

Todos os materiais dos quais o concreto é composto afetam diretamente a sua resistência e seu desempenho final. Assim, os agregados também são extremamente importantes para análise criteriosa das propriedades do concreto. Qualquer variação dos materiais componentes do concreto merece um estudo sistemático e isso também

se aplica ao agregado reciclado, principalmente quando se pensa que eles correspondem até 80% de toda mistura (LEITE, 2001).

Segundo Lima (1999), concretos com reciclado apresentam resistência igual ou menor às de concretos convencionais. Em apenas alguns casos específicos a resistência pode ser maior. A perda de resistência de concretos com reciclado de concreto pode chegar a 30 %, enquanto que para concretos com reciclado de alvenaria pode chegar a 50 %, dependendo da composição e do consumo de cimento.

De acordo com Rao *et al.* (2007) *apud* Santiago (2008), além da relação *a/c*, a resistência à compressão dos concretos reciclados é influenciada pelo tipo de material utilizado para produzir o agregado de RCD, pela taxa de substituição, e ainda pela condição de utilização do agregado de RCD (saturado ou não saturado).

d) Resistência à tração

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 (LEITE, 2001).

Machado Jr. *et al.* (1998) e Bazuco (1999) *apud* Leite (2001) afirmam que não há influência da utilização de agregado graúdo reciclado na resistência à tração de concretos. Os autores mencionam ainda que concretos com material reciclado obedecem às mesmas relações teóricas entre resistência à tração e resistência à compressão que concretos convencionais de mesma classe. Porém, Bazuco (1999) ressalta que quando se utiliza também o agregado miúdo reciclado, tal propriedade apresenta uma redução da ordem de 10 a 20%.

Segundo Leite (2001), avaliando as características do material reciclado, seria interessante mencionar que este tipo de material oferece vantagens em relação às propriedades de aderência e assim o comportamento normal esperado seria uma melhoria da resistência à tração dos concretos produzidos com agregados reciclados.

e) Durabilidade

A durabilidade de concretos é uma propriedade ligada capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

De acordo com Brandão (1998); Neville (1997) *apud* Tenório (2007), apesar de tantos serem os fatores ligados à durabilidade do concreto, esta característica depende muito da facilidade com que fluidos (líquidos e gases) podem adentrar e movimentar-se em seu interior, de forma que ela é muito mais dependente da permeabilidade e capacidade de absorção do compósito, as quais são condicionadas à porosidade, do que de propriedades bastante aceitas, como resistência, módulo de elasticidade, etc..

Quebaud *et al.* (1999) *apud* Leite (2001) realizaram estudos em concretos com agregados reciclados e agregados naturais, substituindo 100% das duas frações (miúda e graúda), e substituindo apenas parte das frações e mediram a permeabilidade dos concretos à água, ao ar e de superfície. Concluíram que os concretos com agregados naturais apresentam uma permeabilidade à água que é 2 a 3 vezes inferior à permeabilidade de concretos reciclados. De acordo com os autores, isto se deve ao uso de agregados naturais pouco porosos e que levam a menor porosidade da matriz de concreto e ao uso de relações água/cimento menores. A permeabilidade ao ar foi 2 a 5 vezes inferior para os concretos convencionais. Quanto maior a proporção de areia reciclada mais permeável é o concreto. A permeabilidade de superfície dos concretos reciclados também é maior que a dos concretos convencionais.

Assim, concretos reciclados menos penetráveis e, por conseguinte, mais duráveis, podem ser obtidos por meio da redução da porosidade da fase agregado. Redução essa conseguida através da redução do teor de participação de agregados reciclados na composição do concreto ou através da redução da porosidade individual do agregado graúdo reciclado (TENÓRIO, 2007).

3. CONCRETO LEVE

3.1. Definição

Os concretos leves caracterizam-se pela redução da massa específica em relação aos concretos convencionais, consequência da substituição de parte dos materiais sólidos por ar. Podem ser classificados em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos (ROSSIGNOLO, 2009). Nesse trabalho será estudado o concreto com agregados leves por ser o que usualmente apresenta aplicação estrutural.

Os concretos com agregados leves, também conhecidos como concretos leves estruturais (CLE) são obtidos com a substituição parcial ou total dos agregados convencionais por agregados leves. Em geral, são considerados CLE os concretos que apresentam massa específica aparente abaixo de 2000 kg/m³ (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de referência da massa específica dos concretos leves estruturais (ROSSIGNOLO, 2009)

Referência	Massa específica aparente (kg/m ³)
NM 35 (1995)	1680 < γ < 1840
ACI 213R-03 (2003)	1120 < γ < 1920
EUROCODE 2 (2007)	900 ≤ γ ≤ 2000
NS 3473 E (1998)	1200 < γ < 2200
CEB-FIP (1977)	γ < 2000
RILEM (1975)	γ < 2000

Além disso, o ACI 213R-03 (2003) especifica que o concreto leve estrutural deve apresentar também resistência à compressão aos 28 dias acima de 17 MPa.

A ASTM C 330 e C 331 especifica que os agregados leves utilizados na produção de concretos leves estruturais devem apresentar valores máximos de massa unitária no estado seco e solto de 1120 kg/m³, para agregados miúdos, e de 880 kg/m³, para agregados graúdos.

Outra definição importante é o parâmetro denominado Fator de Eficiência (FE), que de acordo com Evangelista (1996), é a relação entre resistência à compressão (em MPa) e a massa específica seca (em kg/dm³). Segundo Spitzner (1994) e Armelin *et al.* (1994), o concreto é considerado concreto leve de alto desempenho quando apresenta

um fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg. Esse valor limite considera como referência um concreto convencional, com resistência à compressão de 60 MPa e massa específica de 2400 kg/m³, classificado como de alta resistência.

3.2. Histórico

A primeira indicação conhecida da aplicação dos concretos com agregados leves data de aproximadamente 1100 a.C., quando construtores pré-colombianos, originários da região da atual cidade de El Tajin, localizada no México, utilizaram uma mistura de pedra-pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal para a construção de elementos estruturais (ROSSIGNOLO, 2009).

Os concretos leves também foram utilizados pelos romanos, com a intenção de reduzir as cargas nas estruturas, combinando um ligante à base de cal e rochas vulcânicas. Uma das principais construções com concretos leves da época romana data do início do segundo século da nossa Era (110 – 125 d.C.), quando o Panteão de Roma (Figura 3a e b) foi reconstruído pelo imperador Adriano, após ter sido destruído por um incêndio. Foi utilizado concreto leve com pedra pomes para a construção da cúpula abobadada desse monumento com 44 m de diâmetro e que se encontra, atualmente, em excelente estado de conservação, após quase 2000 anos de sua construção (MITIDIERI, 1976 *apud* ROSSIGNOLO, 2003).

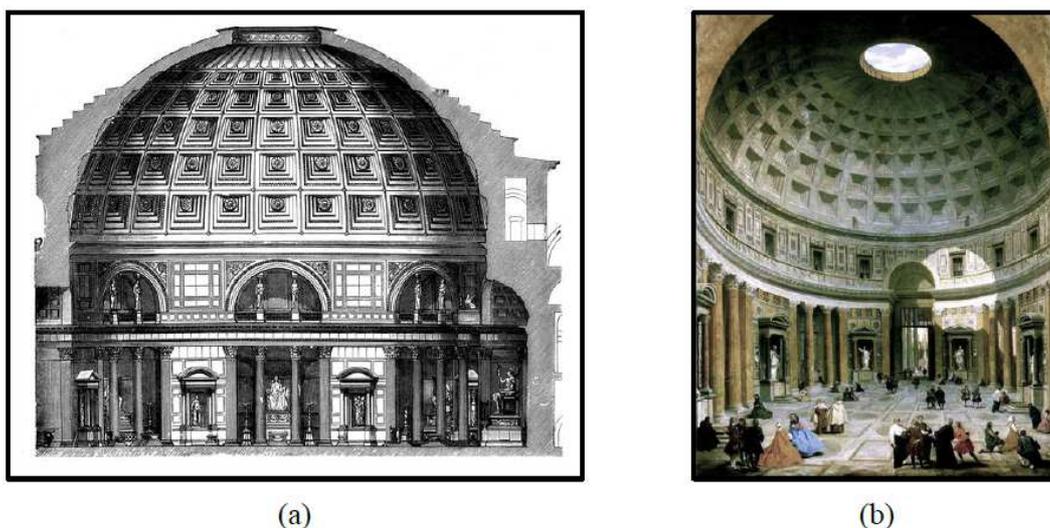


Figura 3 - Domo do Panteão de Roma: (a) corte do panteão; e (b) o interior do panteão no século XVIII - pintura de Giovanni Panini. (Fonte: Wikipédia *apud* GRABOIS, 2012)

Uma das primeiras aplicações do concreto leve armado foi na construção de navios e barcos pela “Emergency Fleet Building Corp” durante a 1ª Guerra Mundial. O concreto apresentava resistência à compressão de 34,5 MPa e massa específica de 1,76 kg/dm³, utilizando folhelho expandido como agregado leve (ACI 213R-87, 1987 *apud* EVANGELISTA, 1996).

De acordo com Rossignolo (2009), a primeira aplicação do concreto leve estrutural em edifícios de múltiplos pavimentos ocorreu em 1929, na cidade de Kansas, na expansão do edifício de escritórios da Southwestern Bell Telephone Company (Figura 4). Esse edifício – construído inicialmente com 14 pavimentos, com estrutura em concreto convencional – foi projetado para receber mais 8 pavimentos. No entanto, os projetistas verificaram que se fosse utilizado concreto leve na estrutura poderiam ser executados seis pavimentos adicionais, além dos oito já previstos. Assim, a estrutura dos últimos 14 pavimentos desse edifício foi executada em concreto leve com 25 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. Nesse mesmo ano, foi finalizado o hotel Chase-Park Plaza, na cidade norte-americana de St. Louis, primeiro edifício de múltiplos pavimentos (28 andares) com estrutura integralmente executada em concreto com agregados leves (Figura 5).



Figura 4 - Edifício da Southwestern Bell Telephone Company, em Kansas, nos Estados Unidos (ESCSI,1971)



Figura 5 - Hotel Chase-Park Plaza, na cidade de St. Louis, nos Estados Unidos (ESCSI,1971)

A partir dos anos de 1970, com o aprimoramento da tecnologia dos concretos e com o desenvolvimento de novos materiais componentes, como aditivos redutores de água e as adições pozolânicas, tornou-se mais fácil a obtenção de concretos com alta resistência mecânica e elevada durabilidade (ROSSIGNOLO, 2009).

O peso próprio em estruturas de concreto é de fundamental importância, pois representa uma elevada parcela do carregamento total. Concreto estrutural leve tem sido usado em inúmeras situações. Produzido a partir da utilização de agregados leves, obtidos do processo de queima acelerada de materiais como xisto, cerâmica e ardósia, é conhecido por seu bom desempenho e durabilidade em aplicações estruturais. “O reduzido peso próprio do concreto de agregado leve diminuirá a carga gravitacional e massa inercial sísmica, resultando em elementos menores e desconto das forças sobre a fundação.” (SHI e WU, 2005 *apud* GRABOIS, 2012).

No Brasil, segundo Rossignolo (2009), a utilização de concretos leves surgiu em 1965, quando o Grupo Rabello fundou a Construção Industrializada Nacional (CINASA), com o objetivo de produzir elementos pré-fabricados em concreto armado para a construção de habitações. Com o intuito de melhorar o desempenho desse processo produtivo, verificou-se a possibilidade de utilizar concreto leve nos elementos pré-fabricados para facilitar o transporte e a montagem das peças. Em virtude da ausência de fornecedores de agregados leves no Brasil, o Grupo Rabello decidiu implantar uma unidade de produção desse material. Essa nova empresa do Grupo, a Cinasita, iniciou a produção de argila expandida em 1968 e desde então, esse material encontra aplicação em diversos setores da construção civil.

3.3. Agregados leves

Os agregados leves podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os agregados leves naturais são obtidos por meio da extração direta em jazidas, seguidas de classificação granulométrica. Esse tipo de agregado leve tem pouca aplicação em concretos estruturais em função da grande variabilidade de suas propriedades e da localização e disponibilidade das jazidas. Como exemplos, têm-se a pedra-pomes e o tufo vulcânico. Já os agregados leves artificiais são obtidos em processos industriais e, normalmente, são classificados com base na matéria-prima utilizada e no processo de fabricação, como a argila expandida e a escória sinterizada (ROSSIGNOLO, 2009). Mehta e Monteiro (2008) apresentaram um espectro de agregados leves variando entre 80 e 900 kg/m³, conforme mostrado na Figura 6.

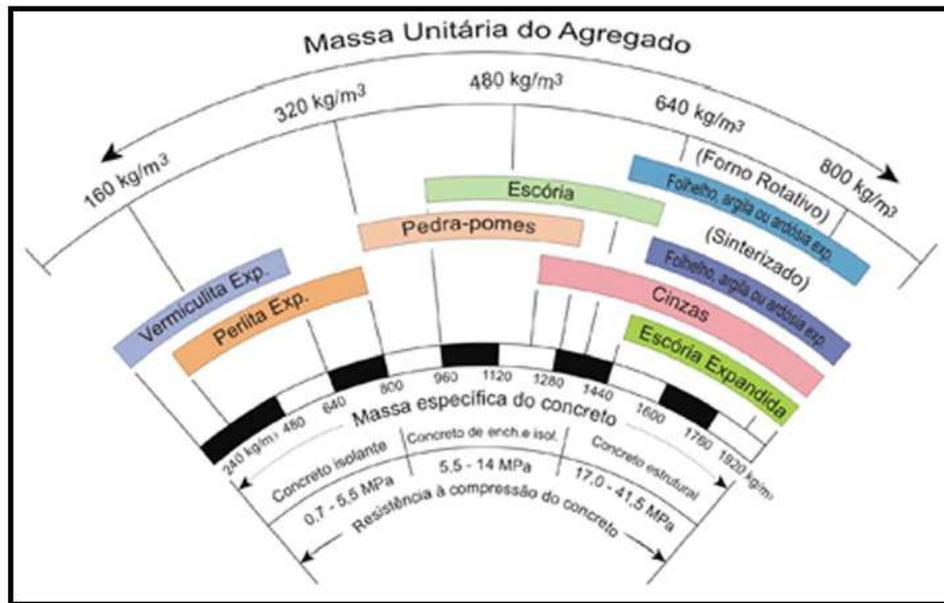


Figura 6 - Espectro dos agregados leves (Adaptado de Litvin, A.; Fiorato, A. E., *Concr. Int.*, v. 3, n. 3, p.49, 1981) (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

De acordo com a ASTM C 330 e C 331, os agregados miúdos e graúdos para serem considerados leves devem apresentar massa unitária menor que 1120 kg/m³ e 880 kg/m³, respectivamente. Segundo Moravia *et al.* (2006) *apud* Santiago (2008), quanto maior a dimensão do agregado leve, maior será a porosidade intrínseca do material, e menor será a massa unitária. Consequentemente, os concretos produzidos com esse material apresentam uma redução da sua massa específica, quer no estado fresco ou endurecido.

A textura e a forma das partículas dos agregados leves artificiais dependem, essencialmente, do processo de fabricação. Os agregados produzidos pelo processo de sinterização apresentam alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa. Esse tipo de agregado proporciona boa aderência à pasta de cimento em função da rugosidade da superfície; entretanto, apresenta também altos valores de absorção de água em função da alta porosidade externa. Em decorrência da forma angular, esses agregados aumentam a quantidade de água da mistura para a obtenção da trabalhabilidade desejada (ZHANG; GJØRV, 1990; CEB/FIP, 1977 *apud* ROSSIGNOLO, 2009).

A utilização de agregados leves para concreto está diretamente ligada à redução dos impactos gerados pela construção civil, sejam estes sociais, econômicos ou ambientais, sobretudo no que se diz respeito à utilização de concreto de cimento Portland. A utilização deste material em conjunto com a tecnologia de concretos

autoadensáveis pode otimizar os processos construtivos, reduzindo peso e seções de peças estruturais, assim reduzindo custos totais com fundações e estruturas (METHA e MONTEIRO, 2008), além de facilitar o manuseio e transporte dos elementos; elimina processos de vibração e adensamento, reduzindo a poluição sonora e melhorando condições ambientais no entorno das construções; agrega possibilidades de isolamento térmico e acústico para os elementos produzidos, possibilitando melhores condições de conforto ambiental para as edificações (GRABOIS, 2012).

3.4. Propriedades do concreto leve

Os concretos são materiais heterogêneos e suas propriedades dependem, essencialmente, das propriedades individuais de cada componente e da compatibilidade entre eles. As principais propriedades dos concretos influenciadas pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves são massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento (ROSSIGNOLO, 2003).

Das propriedades do concreto no estado fresco, a trabalhabilidade merece atenção especial por ser muito influenciada pela baixa massa específica e a alta absorção de água dos agregados, e por isso a trabalhabilidade dos concretos leves é diferente dos concretos convencionais. O concreto leve com abatimento de 50 mm a 70 mm equivale ao abatimento de 100 mm a 125 mm do concreto convencional. A porosidade do agregado leve provoca a perda de abatimento no concreto, devido à absorção de água continuada. O abatimento do concreto leve deve ser limitado a 100 mm, para não causar sedimentação da argamassa e heterogeneidade da mistura durante o adensamento. Mehta e Monteiro (1994) afirmam que o agregado leve tende a segregar e flutuar em misturas muito fluidas (Figura 7). Para reduzir esta tendência, os autores aconselham, além de limitar o abatimento máximo, incorporar de 5% a 7% de ar, para baixar o consumo da água de amassamento (SANTIAGO, 2008).

A segregação e a exsudação dos concretos leves podem ser evitados ou minimizados tomando-se alguns cuidados no processo de dosagem, como granulometria adequada dos agregados, substituição total ou parcial do agregado miúdo por areia natural e utilização de adições minerais (ROSSIGNOLO, 2003).

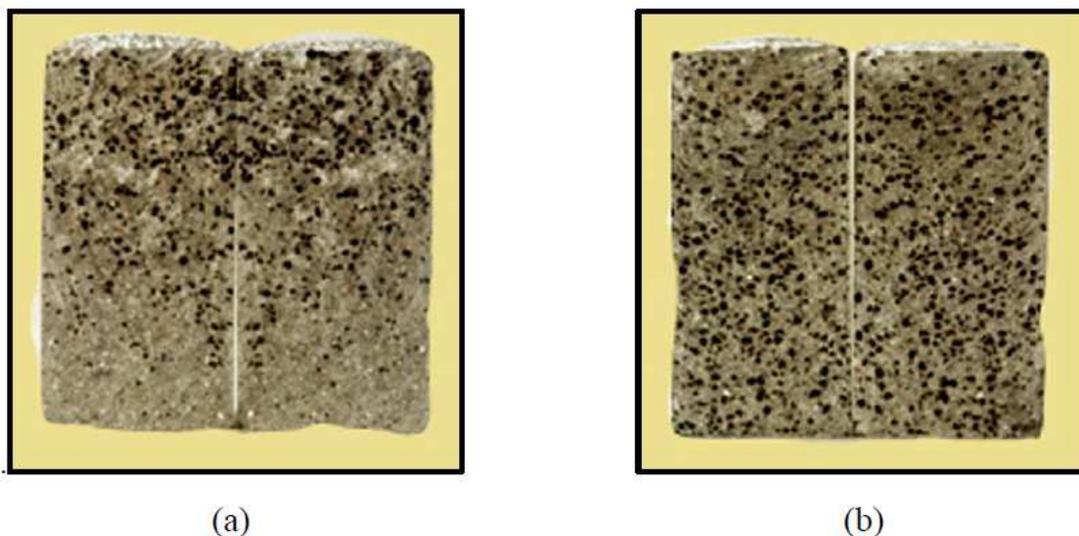


Figura 7 - (a) concreto com segregação dos grãos de argila expandida em comparação com (b) onde não ocorreu segregação (COLEPARDI *et al.*, 2004 *apud* GRABOIS, 2012)

A resistência à compressão e a massa específica são as propriedades mais utilizadas na caracterização dos concretos leves estruturais e estão diretamente relacionadas com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado. A granulometria dos agregados tem mais influência na massa específica e na resistência mecânica dos concretos leves do que nos concretos tradicionais, uma vez que o valor da massa específica dos agregados leves, como é o caso da argila expandida, é inversamente proporcional à sua dimensão (ROSSIGNOLO, 2003).

O desenvolvimento da resistência à compressão ocorre mais rapidamente nos concretos leves, do que nos concretos convencionais. Segundo Eurolightcon (citado por ROSSIGNOLO, 2003), aos 7 dias, os concretos leves já apresentam mais de 80% da resistência à compressão aos 28 dias, e após esse período não há grandes aumentos na resistência. No estudo de Lo e Cui (2004), por exemplo, aos 7 dias o concreto leve contendo argila expandida alcançou 91,2% da resistência à compressão obtida aos 28 dias. Estes autores atribuem esse rápido ganho de resistência à melhoria da aderência na interface agregado leve/matriz. Os concretos convencionais alcançam, em 7 dias, de 70% a 80% da resistência aos 28 dias (LO e CUI, 2004) (SANTIAGO, 2008).

Segundo o relatório do Eurolightcon (1998) *apud* Rossignolo (2003), as principais diferenças entre os concretos leves e os tradicionais, com relação a propriedade de resistência à tração, podem ser resumidas em:

- o tipo de fratura. Nos concretos leves, a fratura ocorre através do agregado e não ao redor do agregado, na zona de transição agregado-matriz, como ocorre nos concretos tradicionais;
- o teor de umidade do concreto, que pode ser maior nos concretos leves do que nos tradicionais para as mesmas condições de cura e pode causar uma redução significativa no valor da resistência à tração;
- a resistência à tração na flexão nos concretos leves, é mais afetada do que a resistência à tração na compressão diametral.

O módulo de deformação está diretamente relacionado com o tipo e com a quantidade de agregado leve utilizado. Quando mais próximos forem os valores do módulo de deformação do agregado e da pasta de cimento, melhor será o comportamento do concreto no regime elástico. Como os agregados leves apresentam valores do módulo de deformação relativamente baixos, os concretos leves apresentam valores de módulo de deformação inferiores aos observados para os concretos convencionais (ROSSIGNOLO, 2009).

As propriedades térmicas dos concretos leves são significativamente diferentes das observadas nos concretos tradicionais. O ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves reduz a transferência e a absorção de calor em relação aos agregados tradicionais, alterando assim as propriedades térmicas dos concretos, como por exemplo, a redução da condutividade térmica. Por esta razão, algumas edificações utilizam o concreto leve na vedação das fachadas e na cobertura para reduzir a absorção e a transferência para o ambiente interno do calor proveniente da radiação solar (CEB/FIP, 1977; EUROLIGHTCON, 1998; HOLM e BREMNER, 2000 *apud* ROSSIGNOLO, 2003).

Os concretos leves geralmente apresentam maior resistência ao fogo do que os concretos tradicionais. Esta performance superior dos concretos leves pode ser atribuída à combinação dos seguintes fatores: menor condutividade térmica, menor coeficiente de expansão térmica e maior estabilidade dos agregados leves quando expostos a altas temperaturas (EUROLIGHTCON, 1998; NOUMOWÉ et al., 2000 *apud* ROSSIGNOLO, 2003).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Programa experimental

O programa experimental desse trabalho foi baseado no estudo realizado por Grabois (2012). Considera a pesquisa de Iniciação Científica realizada no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, no período de setembro de 2012 a março de 2013, com objetivo de realizar um estudo a ser apresentado como projeto final de curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da UFRJ.

Foi utilizado como agregado, o resíduo de construção e demolição proveniente de alvenaria conhecido como resíduo “vermelho”, devido a sua baixa massa específica.

Foram definidos dois traços a serem utilizados com a finalidade de comparar os resultados desse estudo com as referências dos traços desenvolvidos por Grabois (2012), com substituição de 100% do agregado leve de argila expandida por agregado reciclado de tijolo britado.

Vale ressaltar que os materiais cimentícios, a areia e o aditivo químico utilizados nessa pesquisa correspondem aos mesmos tipos e pertencem ao mesmo lote dos utilizados por Grabois (2012).

Complementando este programa experimental, optou-se por avaliar algumas propriedades mecânicas, como resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração direta dos corpos-de-prova dos concretos com idade de 28 dias, após cura úmida. Complementarmente, avaliou-se também a resistência à compressão nos concretos com idades de 1, 3 e 7 dias.

Outra propriedade importante é a massa específica do concreto em seu estado endurecido, para avaliar se o concreto obtido apresenta massa específica próxima as dos concretos leves produzidos por Grabois (2012) e se eles, de fato, podem ser considerados concretos reciclados leves.

4.2. Produção do agregado reciclado

O agregado reciclado foi produzido através da britagem de tijolos cerâmicos maciços (Figura 8), no Laboratório de Materiais de Construção (LAMAC), da Escola Politécnica da UFRJ. O objetivo era produzir um material reciclado leve e com baixa lamelaridade, por isso optou-se pela utilização de material cerâmico, que possui baixa massa específica devido a sua elevada porosidade, como foi observado na revisão

bibliográfica, e a escolha por tijolos maciços foi para evitar que, após a britagem, o agregado se tornasse muito lamelar.

De acordo com Mendes *et al.* (2012), a temperatura de queima dos tijolos maciços varia de 940 a 1200 °C dependendo do tipo de argila, mas geralmente esta temperatura fica em torno de 1050 °C.



Figura 8 - Tijolos cerâmicos maciços

Foi utilizado o britador de mandíbulas móvel QUEIXADA 200 (Figura 9) que fratura o material por compressão (esmagamento). Esse britador possui duas saídas: uma para material grosso e outra para os finos, sendo que o primeiro é produzido em maior quantidade.



Figura 9 - Britador de mandíbulas QUEIXADA 200

Para atingir a granulometria desejada, foi necessário peneirar todo o material grosso na peneira de 12,5 mm e o material retido foi passado novamente no equipamento. Esse processo foi repetido até a quantidade retida na peneira ser considerada desprezível. Ademais, o material fino precisou ser lavado na peneira de malha com abertura de 0,150 mm, com o objetivo de descartar a grande quantidade de material pulverulento que esse agregado apresenta.

4.3. Métodos de ensaios

4.3.1. Composição granulométrica

A determinação da composição granulométrica dos materiais a serem utilizados na produção dos concretos foi realizada para caracterizar os materiais cimentícios – cimento Portland e cinza volante – e os agregados leves, reciclados e convencionais.

Grabois (2012) caracterizou os materiais finos através do analisador de partículas a laser (Malvern Mastersizer), onde os ensaios foram conduzidos com lente 100 (0,5 – 180 μm), álcool etílico absoluto P.A. (meio suspensor) e ultra-som, durante 60 segundos.

Os agregados foram caracterizados por peneiramento de acordo com a NBR NM 248 (2003), com a utilização de conjunto de peneiras (com aberturas entre 75 μm e 19 mm) acopladas a um agitador mecânico.

A caracterização dos agregados leves e convencional foi realizada no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ por Grabois (2012), enquanto que a caracterização dos agregados reciclados foi realizada pelo autor deste trabalho, no Laboratório Central de Pavimentação BR, da Petrobrás Distribuidora.

4.3.2. Massa específica e absorção total

Os valores de massa específica do cimento Portland, da cinza volante e da areia natural quartzosa foram obtidos através de ensaios realizados por Grabois (2012), no Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. O método utilizado foi o de picnometria a hélio que consiste na determinação do volume de uma massa conhecida de amostra através da variação de pressão do gás em um volume calibrado.

Os agregados de argila expandida, tanto gráudo quanto miúdo, também foram ensaiados por Grabois (2012) e foram adotadas as especificações de ABNT NM 53 e NM 52 (2003), respectivamente. Porém, como não existe uma metodologia específica para agregados leves, Grabois (2012) realizou uma adaptação do ensaio para agregados gráudos, onde descreve da seguinte forma: após preparar a amostragem segundo a metodologia descrita nas referidas normas, o material foi inserido entre duas peneiras, com abertura de malha igual ou inferior ao tamanho de suas partículas, fixadas por meio de um arame, em uma balança com dispositivo no centro do prato da balança adequado para mantê-la suspensa na água. Um recipiente estanque contendo água foi utilizado para submergir as peneiras com a amostra. A utilização deste aparato (Figura 10) foi idealizada procurando impedir que alguns grãos, muito leves (massa específica inferior à da água), ficassem sobrenadando na superfície da água, e, dessa forma, invalidassem a realidade dos valores registrados na balança.

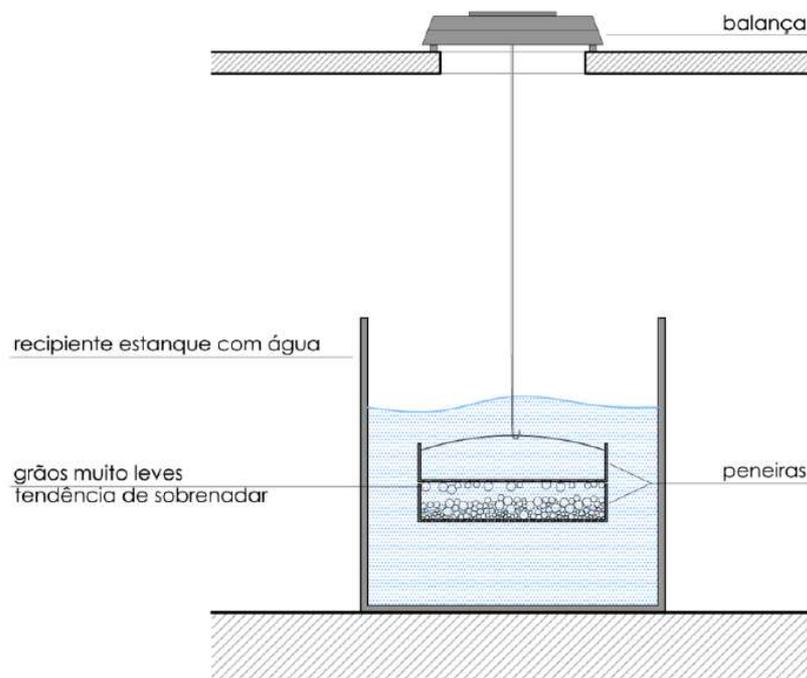


Figura 10 - Aparato utilizado para ensaio de massa específica e absorção para os agregados leves (GRABOIS, 2012)

Para os agregados reciclados gráudo e miúdo, também foram adotadas as especificações da ABNT NM 53 e NM 52 (2009). Neste caso, não foram necessárias as adaptações realizadas por Grabois (2012), porque o material reciclado não apresenta massa específica inferior à da água.

Para a avaliação da capacidade de absorção de água dos agregados graúdos, o procedimento utilizado por Grabois (2012) para o agregado leve e o utilizado pelo autor deste trabalho para o agregado reciclado é semelhante, diferindo apenas nos intervalos de tempo registrados. Após submergir o material dentro das peneiras, foram registrados valores de massa com os seguintes intervalos de tempo: para agregados leves, a cada minuto durante os 10 primeiros minutos; a cada 5 minutos até a primeira meia hora; a cada 30 minutos até completar 2 h e 30 min de ensaio; e para agregados reciclados, a cada minuto durante os 10 primeiros minutos; a cada 5 minutos até a primeira meia hora; a cada 10 minutos até completar a primeira hora; a cada 15 minutos até completar a segunda hora; a cada hora até completar 5 horas de ensaio; foi feita a última leitura 24 horas após o início do ensaio. Antes de cada leitura, o conjunto era agitado cuidadosamente para provocar a saída do ar presente na amostra.

4.3.3. Índice de forma

A determinação do índice de forma do agregado graúdo reciclado foi realizada pelo método do paquímetro, como prescreve a NBR 7809 (2006). Esse ensaio é realizado para agregados graúdos com dimensão máxima característica maior ou igual a 9,5 mm.

De acordo com a definição estabelecida pela NBR 7809 (2006), o índice de forma é a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe.

4.3.4. Equivalente de areia

A determinação do equivalente de areia para o agregado miúdo reciclado foi realizada de acordo com o método de ensaio estabelecido pela NBR 15052 (1992).

Segundo a definição estabelecida nessa norma, equivalente de areia é a relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior da areia e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade de solo ou de agregado miúdo, numa proveta.

O resultado desse ensaio é apresentado em porcentagem e representa a quantidade de areia presente no agregado miúdo.

4.3.5. Abatimento e espalhamento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams é realizado para avaliar a consistência do concreto no estado fresco, de acordo com o método de ensaio estabelecido pela NBR NM 67 (1998). Nesse método, é medido o abatimento do concreto, ou seja, é determinada a diferença entre a altura do molde tronco de cone e a altura do eixo do corpo-de-prova, após a retirada do molde.

No mesmo ensaio, foi avaliado o espalhamento através da média de duas medidas da circunferência formada pelo concreto.

4.3.6. Absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto endurecido

A NBR 9778 (2005) estabelece os procedimentos de ensaio para a determinação da absorção de água (A), do índice de vazios por imersão e fervura (I_v) e dos valores de massa específica seca (ρ_s), saturada (ρ_{sat}) e real (ρ_r) dos concretos endurecidos. O teste foi realizado em corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 100 mm de altura, em concretos com idade de 28 dias, mantidos em cura úmida durante esse período. O cálculo dessas propriedades foi realizado a partir das Equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.1)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3.3)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (3.4)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (3.5)$$

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca em estufa;

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

4.3.7. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

A resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade foram determinados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 (2007), em corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O ensaio foi realizado em uma prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kNI, com capacidade total de carregamento de 1000 kN.

Para evitar a concentração de tensões na face do corpo-de-prova, os corpos-de-prova tiveram suas bases regularizadas e paralelizadas minutos antes de serem ensaiados. A princípio seria utilizado o torno mecânico para este faceamento, porém esse equipamento teve seu funcionamento interrompido ao longo do período de ensaios e foi necessário utilizar a técnica de capeamento com mistura de enxofre em parte dos corpos-de-prova. A Tabela 3 apresenta o tipo de regularização da base utilizado para cada idade e classe de concretos.

Tabela 3 - Tipo de regularização das bases dos corpos-de-prova

Misturas	Idade (dias)			
	1	3	7	28
CRTB 1000	Faceamento - Torno mecânico	Faceamento - Torno mecânico	Capeamento - Mistura de enxofre	Capeamento - Mistura de enxofre
CRTB 7030	Faceamento - Torno mecânico	Capeamento - Mistura de enxofre	Capeamento - Mistura de enxofre	Capeamento - Mistura de enxofre

Os ensaios realizados após 1, 3 e 7 dias de cura úmida tinham como objetivo apenas determinar a carga de ruptura dos corpos-de-prova. Aos 28 dias, o objetivo era também analisar o comportamento tensão *versus* deformação, através do emprego de transdutores elétricos (LVDT) para medição dos deslocamentos longitudinais, acoplados à região central dos corpos-de-prova (Figura 11). A NBR 8522 (2008) prescreve o cálculo do módulo de elasticidade através da curva tensão versus deformação (Equação 3.6).

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.6)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade;

σ_1 é a tensão de compressão correspondente à deformação axial, ε_1 , de $5 \cdot 10^{-5}$;

σ_2 é a tensão de compressão correspondente a 40% da carga última;

ε_1 é a deformação axial igual a $5 \cdot 10^{-5}$;

ε_2 é a deformação axial produzida pela tensão σ_2 .

A velocidade de carregamento utilizada para os ensaios de 1, 3 e 7 dias de cura foi de 0,3 mm/min, enquanto que para o ensaio aos 28 dias a velocidade de carregamento da prensa foi de 0,025 mm/min e os sinais de força e deslocamento foram registrados pelo sistema de aquisição de dados "ADS 2000", de 16 bits, da marca Lynx, com o auxílio do software AQdados.

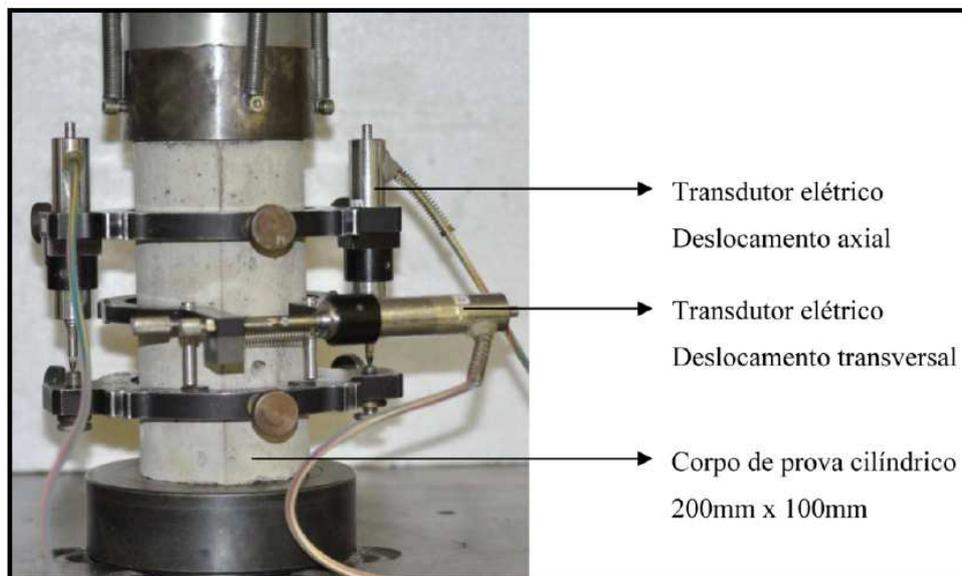


Figura 11 - Configuração do ensaio de resistência à compressão (GRABOIS, 2012)

4.3.8. Resistência à tração direta

Os ensaios de resistência à tração direta foram realizados na prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kNI, com capacidade total de carregamento de 1000 kN. Para a produção dos corpos-de-prova para este ensaio, foram utilizados moldes prismáticos de 100 x 100 x 400 mm, com redutores de seção no interior dos moldes. Todos os corpos-de-prova foram cortados ao meio na direção longitudinal, formando duas amostras para o ensaio.

O objetivo do ensaio foi avaliar a resistência à tração de corpos-de-prova com idade de 28 dias. Para isso, foi utilizado o procedimento adotado por Grabois (2012), que foi desenvolvido por Lima (2004) com adaptações de Velasco (2008), conforme mostrado na Figura 12.

A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,1 mm/min e um sistema com dois LVDT's fixados à região central dos corpos-de-prova determinava os deslocamentos axiais. A aquisição de dados, de carga e deslocamento axial foi realizada pelo sistema "ADS 2000", de 16 bits, da marca Lynx.

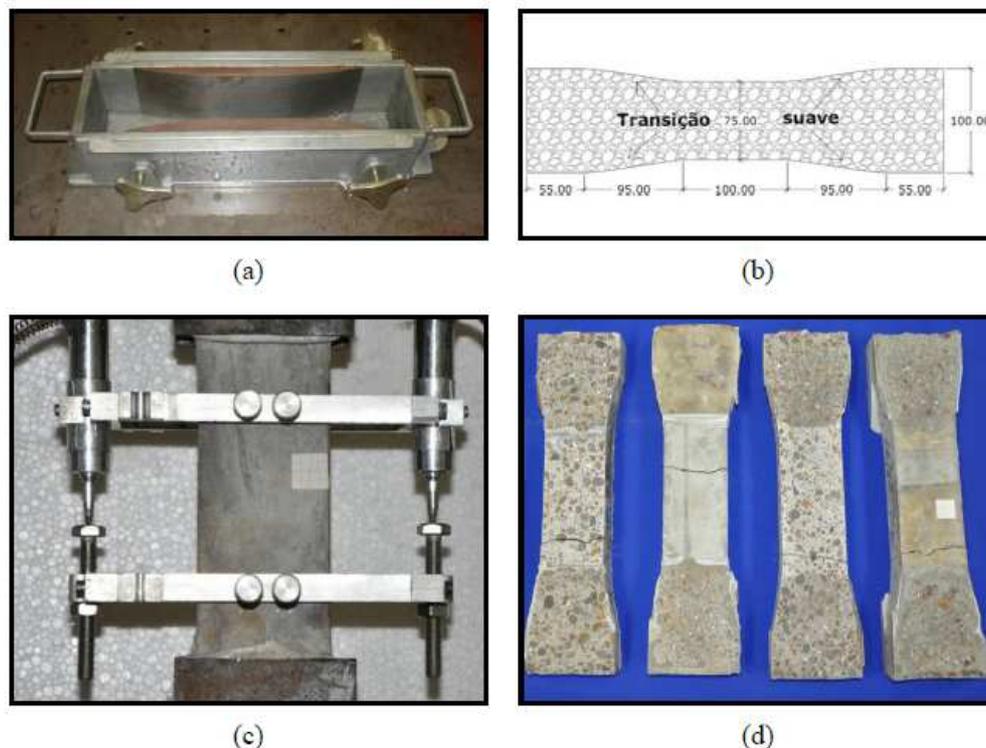


Figura 12 - Ensaio de resistência à tração direta: (a) moldes com redutores de seção (VELASCO, 2008 *apud* GRABOIS, 2012); (b) dimensões das amostras em mm (VELASCO, 2008 *apud* GRABOIS, 2012); (c) Configuração dos LVDT's na região central da amostra (GRABOIS, 2012); e (d) amostras após o ensaio realizado (GRABOIS, 2012).

Os valores de tensão foram calculados a partir da Equação 3.7.

$$\sigma = \frac{F}{b.e} \quad (3.7)$$

Onde:

F = carga aplicada;

b = largura do corpo-de-prova (seção central);

e = espessura do corpo-de-prova.

4.4. Caracterização dos materiais

4.4.1. Materiais Cimentícios

Neste trabalho foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI (Figura 13), produzido pela Lafarge, que apresenta alta resistência inicial e não possui adições minerais. O cimento utilizado pertencia a um mesmo lote de produção.



Figura 13 - Cimento Portland CPV – ARI

A cinza volante foi adotada como um aditivo de substituição parcial do cimento nas três misturas produzidas. Ela foi produzida no interior de Santa Catarina e pertencia a um único lote de produção. A Figura 14 apresenta a cinza volante utilizada.



Figura 14 - Cinza volante

A escolha desses tipos de materiais foi feita para permitir a comparação entre o presente estudo com o trabalho de pesquisa desenvolvido por Grabois (2012), nesse mesmo laboratório.

A caracterização dos materiais finos foi realizada por Grabois (2012). Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 4. As curvas granulométricas dos materiais são apresentadas na Figura 15.

Tabela 4 - Composição química, propriedades físicas e diâmetro das partículas do cimento Portland e da cinza volante adotados (GRABOIS, 2012)

Composição química (%)			Propriedades físicas		
Determinações	CPV-ARI	Cinza Volante	Propriedades	CPV-ARI	Cinza Volante
CaO	70,856	1,94	M. específica (kg/m ³)	3208,6	2404,7
SiO ₂	13,096	51,58	Compacidade	0,53	0,54
SO ₃	5,751	1,51			
Al ₂ O ₃	4,299	32,65			
Fe ₂ O ₃	4,276	5,8			
K ₂ O	0,943	3,39			
SrO	0,307	0,03			
TiO ₂	0,246	1,3			
MnO	0,15	0,05			
ZnO	0,055	0,04			
CuO	0,019	-			

Propriedades granulométricas		
Diâmetro	CPV-ARI	Cinza Volante
D ₈₀ (µm)	32,64	65,75
D ₅₀ (µm)	12,55	18,98

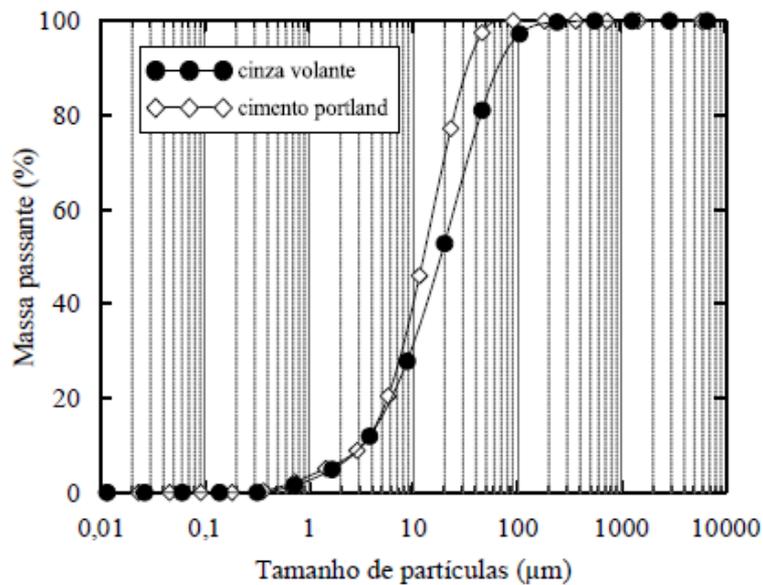


Figura 15 - Curvas granulométricas do cimento Portland e cinza volante (GRABOIS, 2012)

4.4.2. Agregados

Nesse estudo, foram utilizados agregados leves, naturais e reciclados. Como agregado graúdo, adotou-se 100% de tijolo britado grosso. Como agregado miúdo, utilizou-se areia natural quartzosa, argila expandida fina (AEf) e tijolo britado fino.

4.4.2.1. Agregados Leves e Agregado Natural

A areia natural quartzosa utilizada é proveniente do Rio Guandu, no Rio de Janeiro, e os agregados leves de argila expandida foram produzidos pela empresa Cinasita, localizada no estado de São Paulo e comercialmente distribuída pelo país (Figura 16). Nas duas dosagens utilizadas como referência nesse trabalho, Grabois (2012) usou 100% de argila expandida como agregado graúdo e 100% de areia natural em uma mistura e outra com 70% de areia natural e 30% de argila expandida fina como agregado miúdo.



Figura 16 - Areia natural quartzosa

As propriedades físicas de massa específica, absorção e compactidade dos agregados e a classificação granulométrica são apresentadas na Tabela 5. As curvas granulométricas estão representadas na Figura 17.

Agregados leves são muito porosos e possuem elevado índice percentual de absorção de água, principalmente se comparado aos agregados naturais (GRABOIS, 2012). A Figura 18 apresenta a capacidade de absorção dos agregados leves, ou seja, o percentual de absorção em função do tempo, com destaque para os primeiros 30 minutos de ensaio.

Tabela 5 - Propriedades físicas e granulométricas dos agregados leves e natural (GRABOIS, 2012)

Propriedades físicas			
Propriedades	Areia	AEf	AEg
M. específica (kg/m ³)	2667,9	1541,4	956,4
Absorção (%)	1,4	6,45	13,95
Compactidade	0,6	0,77	0,66

Propriedades granulométricas			
Propriedades	Areia	AEf	AEg
Dimensão máxima	2,36	4,75	12,5
Módulo de finura	2,64	3,34	-
Classificação	média	média	-

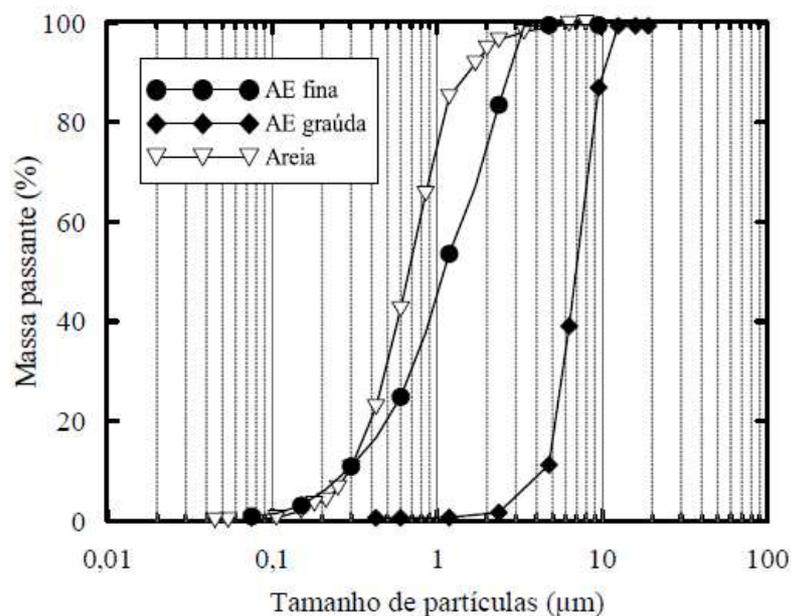


Figura 17 - Curvas granulométricas dos agregados leves e natural (GRABOIS, 2012)

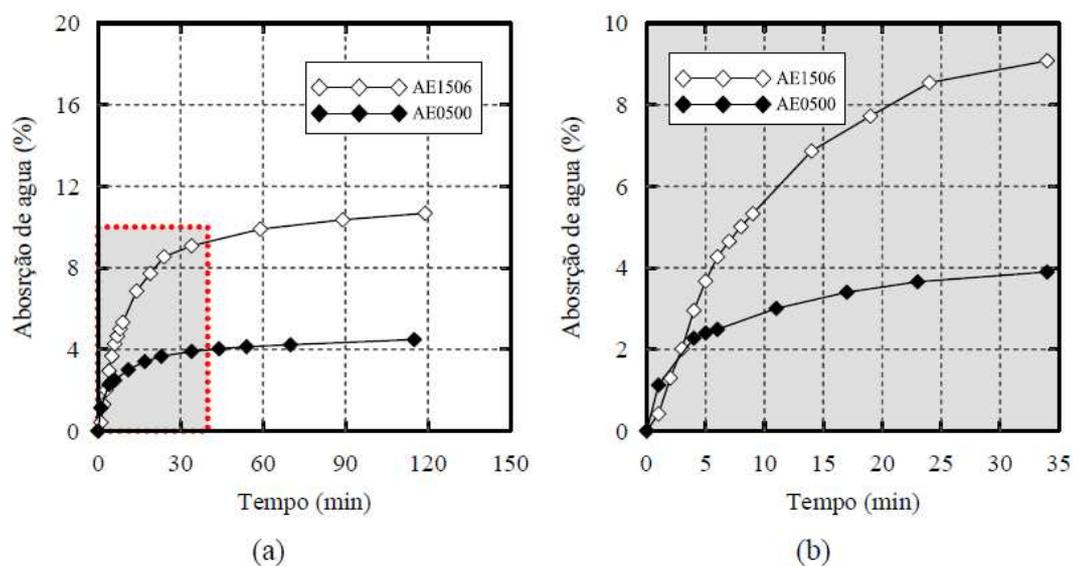


Figura 18 - (a) Percentual de absorção dos agregados leves miúdo (AE0500) e graúdo (AE1506); (b) ampliação, no detalhe, dos 35 minutos iniciais de ensaio (GRABOIS, 2012)

4.4.2.2. Agregados Reciclados

Os agregados reciclados foram produzidos em laboratório, provenientes da britagem de tijolos cerâmicos maciços. Foram utilizadas duas frações de tijolo britado, uma correspondente aos grãos de tamanho máximo de 4,75 mm (denominada neste

trabalho de TBf) e outra de dimensões entre 4,75 e 12,5 mm (denominada por TBg). Essas frações são apresentadas na Figura 19.



Figura 19 - (a) Fração graúda de tijolo britado (TBg); (b) Fração miúda de tijolo britado (TBf)

As propriedades físicas de massa específica, absorção, equivalente de areia e índice de forma são apresentadas na Tabela 6, além da classificação granulométrica.

Os agregados reciclados possuem um elevado percentual de absorção de água. Ademais, esse material absorve praticamente toda a quantidade de água a ser absorvida em um curto espaço de tempo. A Figura 21 apresenta o percentual de absorção do agregado reciclado graúdo em função do tempo, com destaque para os primeiros 35 minutos de ensaio.

Tabela 6 - Propriedades físicas e granulométricas dos agregados reciclados

Propriedades físicas		
Propriedades	TBf	TBg
M. específica (kg/m ³)	2070	1861
Absorção (%)	11,4	16,4
Equivalente de areia	66,9	-
Índice de forma	-	2,5
Propriedades granulométricas		
Propriedades	TBf	TBg
Dimensão máxima	4,75	9,5
Módulo de finura	2,98	-
Classificação	média	-

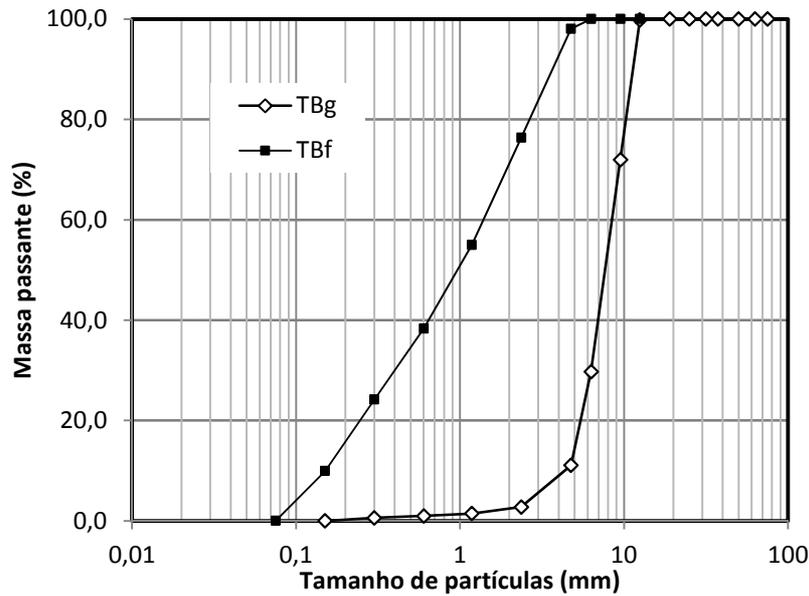


Figura 20 - Curva granulométrica dos agregados reciclados

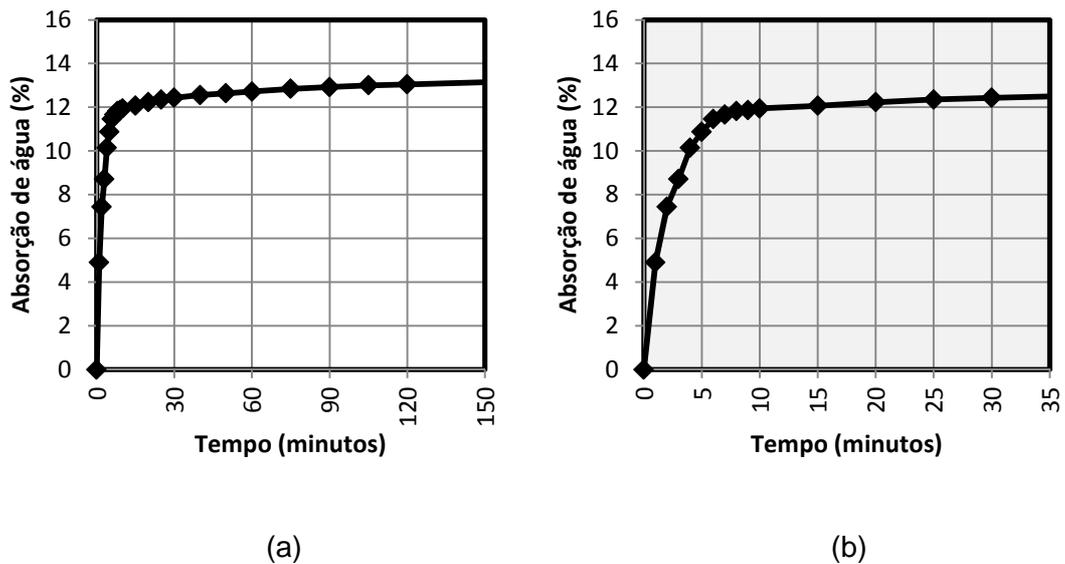


Figura 21 - (a) Percentual de absorção do agregado graúdo reciclado; (b) ampliação dos 35 minutos iniciais de ensaio

4.4.3. Aditivo químico – Superplastificante

Neste trabalho foi utilizado o aditivo Superplastificante Glenium 160 SCC (Figura 22), produzido pela empresa BASF, que tem como base uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando alta redução de água, melhorando a trabalhabilidade sem alterar o tempo de pega. A

Tabela 7 apresenta as principais características do superplastificante, fornecidas pelo fabricante.



Figura 22 - Superplastificante Glenium 160 SCC

Tabela 7 - Propriedades do aditivo superplastificante (www.basf.com.br)

Descrição	Características
Tipo	Éter policarboxílico
pH	5,0 - 7,0
Densidade (g/cm ³)	1,087 - 1,127
Teor de Sólidos (%)	38,5 - 41,5

Foram utilizados os valores médios de densidade e teor de sólidos do superplastificante para os cálculos de dosagem.

4.4.4. Água

A água utilizada na confecção dos concretos foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

4.5. Metodologia de produção dos concretos

4.5.1. Dosagem dos concretos

Os concretos foram dosados a partir de dois traços definidos por Grabois (2012). O objetivo deste estudo era produzir concretos leves, utilizando resíduo de construção e demolição como parte dos agregados, desempenhando função estrutural, com resistência à compressão aos 28 dias (f_{c28}) em torno de 35 MPa.

O traço foi ajustado de acordo com as propriedades físicas dos materiais constituintes. Conforme apresentado anteriormente, os materiais cimentícios, a areia e o superplastificante utilizados nesse estudo foram os mesmos utilizados por Grabois (2012). Porém, como na literatura foi utilizada argila expandida como parte dos agregados, foi necessário adequar a dosagem de acordo com a massa específica e absorção do tijolo britado.

O traço em massa foi convertido para traço em volume, de modo que fosse possível comparar as propriedades das classes de concretos leves com as classes dos concretos reciclados.

Desta forma, foram desenvolvidas duas classes de concretos, ambas com a totalidade dos agregados graúdos de tijolo britado (TBg). A diferença na composição dos traços é a substituição de parte do agregado miúdo de areia natural quartzosa por tijolo britado fino (TBf). Após alguns testes, Grabois (2012) definiu que a substituição ideal equivale a 30 % em massa do total de agregado miúdo, com base nas propriedades desejadas pelo autor.

Ambas as classes de concretos foram dosadas com substituição de 30% em massa de cimento Portland por cinza volante. Segundo Grabois (2012), além de promover reduções sobre o consumo de cimento Portland, este fato proporciona melhores condições de fluidez, viscosidade e diminuição do consumo de aditivos superplastificantes.

As relações água-material cimentício (a/mc) definidas pelo autor para as duas classes de concretos se mostraram insuficientes para a moldagem, sendo necessários alguns testes, com avaliação das propriedades do concreto no estado fresco, para a correção deste fator. Após algumas tentativas, concluiu-se que o fator água-material cimentício para a mistura da classe CRTB 1000 foi de 0,50 e a relação água-cimento foi de 0,71, enquanto que para a CRTB 7030 foi de 0,58 e 0,83, respectivamente.

A quantidade de superplastificante utilizada na dosagem é equivalente a 2,5% da massa total de material cimentício na mistura CRTB 1000 e 1,9% na mistura CRTB 7030.

As duas classes foram nomeadas de forma semelhante à nomenclatura utilizada por Grabois (2012), ou seja, de acordo com o material constituinte que as diferenciou. Assim, uma com 100% de areia natural, CRTB 1000, e a outra com 70% de areia e 30% de agregado reciclado de TBf, CRTB 7030.

Apesar dos traços dos concretos reciclados serem baseados nos traços de Grabois (2012), a quantidade – em massa – de material por volume de concreto pode ser considerada bem distinta. Isso se deve pela diferença da massa específica dos agregados reciclados em relação aos agregados leves utilizados pelo autor e pelo aumento do fator água-material cimentício em relação às misturas de referência. A composição dos concretos é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição dos concretos em kg/m³

Misturas	Materiais (kg/m ³)										Fator a/mc
	Cimento Portland	Cinza Volante	Areia Natural	AEf	TBf	AEg	TBg	Água	SP	VMA	
CLAA 1000 GRABOIS (2012)	357	153	702	-	-	371	-	170,8	12,9	-	0,36
CRTB 1000	327	140	642	-	-	-	661	233,4	11,9	-	0,50
CLAA 7030 GRABOIS (2012)	329	141	545	234	-	280	-	188,5	8,9	0,01	0,42
CRTB 7030	302	129	500	-	288	-	500	249,9	8,1	-	0,58

No entanto, para que fosse possível comparar as propriedades dos concretos, a relação entre o volume de um material constituinte da mistura e o volume de material cimentício foi mantida constante em relação ao traço original, excetuando-se a quantidade de água, que foi aumentada. Essa comparação é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Relação entre o volume dos materiais constituintes e o volume de material cimentício

Misturas	Materiais (m ³ /m ³ de material cimentício)										
	Cimento Portland	Cinza Volante	Areia Natural	AEf	TBf	AEg	TBg	Água	SP	VMA	
CLAA 1000 GRABOIS (2012)	0,64	0,36	1,50	-	-	2,22	-	0,98	0,07	-	
CRTB 1000	0,64	0,36	1,50	-	-	-	2,22	1,46	0,07	-	

CLAA 7030 GRABOIS (2012)	0,64	0,36	1,27	0,94	-	1,82	-	1,17	0,05	0,00
CRTB 7030	0,64	0,36	1,27	-	0,94	-	1,82	1,69	0,05	-

Além disso, Grabois (2012) desenvolveu uma mistura em concreto autoadensável de massa específica convencional, visando sua comparação com as misturas leves produzidas. Essa mistura foi nomeada de CAA 40 e sua composição está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição da mistura CAA 40 em kg/m³

Misturas	Materiais (kg/m ³)						
	Cimento Portland	Cinza Volante	Areia Natural	Agregado Graúdo	Água	SP	VMA
CAA 40 GRABOIS (2012)	315	135	995	660	209,48	11,03	0,02

4.5.2. Produção dos concretos

Na produção do concreto, foi utilizada uma betoneira modelo CS – 145 litros do fabricante CSM (Figura 23).



Figura 23 - Betoneira CSM CS 145L

Foi adotada uma metodologia específica para a produção dos concretos devido à alta absorção dos agregados reciclados, baseada nos procedimentos descritos por Grabois (2012), onde os materiais utilizados apresentavam as mesmas condições dos

materiais utilizados pelo autor. As etapas do procedimento de mistura são ilustradas na Figura 24 e podem ser descritas assim:

- Umedecimento da betoneira com água, colocando-se em posição vertical, deixando o excesso de água escorrer;
- Lançamento dos agregados miúdo e graúdo, misturando-os por um minuto, de forma que seja possível uma perfeita homogeneização (Figura 24a e Figura 24b);
- Adição de 50% da água total da mistura aos agregados na condição seca, misturando-se por 8 minutos, para que o agregado reciclado atingisse mais da metade da sua condição de saturação (Figura 24c);
- Em seguida, os materiais cimentícios foram adicionados à mistura, acionando o misturador por mais um minuto, para a devida homogeneização (Figura 24d e Figura 24e);
- Todo o superplastificante e o restante da água total da mistura foram adicionados e misturados por mais 8 minutos para total ação do superplastificante (Figura 24f);

Para a moldagem dos corpos-de-prova, ao final do procedimento de mistura, o concreto foi colocado nos moldes em uma única camada, sendo em seguida vibrados por cerca de 20 segundos em uma mesa vibratória para a expulsão de parte dos vazios incorporados a mistura.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 24 - Sequência do processo de mistura do concreto reciclado: (a) lançamento dos agregados na condição seca; (b) agregados após 1 minuto de mistura; (c) agregados misturados com 50% da água total da mistura; (d) adição dos materiais cimentícios; (e) mistura após homogeneização dos materiais cimentícios; (f) aspecto final da mistura após adição do restante da água e todo superplastificante.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CONCRETO

5.1. Abatimento e espalhamento do tronco de cone

Os ensaios de abatimento e espalhamento do tronco de cone foram realizados para avaliar a consistência e a trabalhabilidade dos concretos reciclados no estado fresco. Os traços adotados nesse estudo foram ajustados a partir das dosagens desenvolvidas por Grabois (2012) para um concreto leve autoadensável. Os valores obtidos nesses ensaios são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Abatimento e espalhamento do tronco de cone dos concretos

Misturas	Tronco de cone	
	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)
CRTB 1000	260	580
CRTB 7030	220	330

Pelo resultado de espalhamento de tronco de cone da mistura CRTB 1000, esta mistura pode ser considerada autoadensável em relação aos valores de espalhamento de concretos autoadensáveis. Segundo Efernac (2002), Nehdi *et al.* (2004), SCC European Work Group (2005) *apud* Grabois (2012), os valores de espalhamento estabelecidos em diferentes dosagens para CAA estão compreendidos entre 500 mm e 700 mm. A substituição de 30% do agregado miúdo natural por agregados reciclados na mistura CRTB 7030 representou uma redução nos valores de espalhamento de tronco de cone, não podendo assim classifica-la como autoadensável. Não era objetivo deste estudo obter uma mistura autoadensável, mas as dosagens de concreto leve utilizadas como ponto de partida era para concretos altamente fluidos, então esta avaliação está sendo realizada para verificar se a substituição de agregados leves de argila expandida por agregados reciclados provoca alterações nesta propriedade.

Os valores de abatimento e espalhamento apresentaram valores inferiores em relação aos obtidos para os traços de concreto leve com argila expandida. Para o traço CRTB 1000, essas alterações foram de cerca de 11% e 14% em relação ao concreto CLAA 1000. Já para o concreto CRTB 7030, essas reduções foram de aproximadamente 21% e 47% em relação ao concreto CLAA 7030. Este comportamento já era esperado devido à elevada absorção de água do agregado reciclado, tanto graúdo quanto miúdo, aliado à sua forma mais angular e textura rugosa, que tendem a deixar a mistura mais áspera e apresentar um maior travamento entre os grãos, onde, mesmo

ajustando o fator água/material cimentício das misturas, a trabalhabilidade e fluidez desses concretos foram reduzidas.

A Figura 25 apresenta o espalhamento das misturas de referência e das misturas em estudo. É possível observar que todas as misturas apresentam homogeneidade, sem ocorrência de segregação e que a substituição de parte do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado na mistura CRTB 7030 diminuiu significativamente o seu espalhamento.

Foi necessário vibrar os concretos produzidos após a moldagem em camada única para que houvesse o desprendimento de bolhas de ar durante a vibração, para facilitar o adensamento.

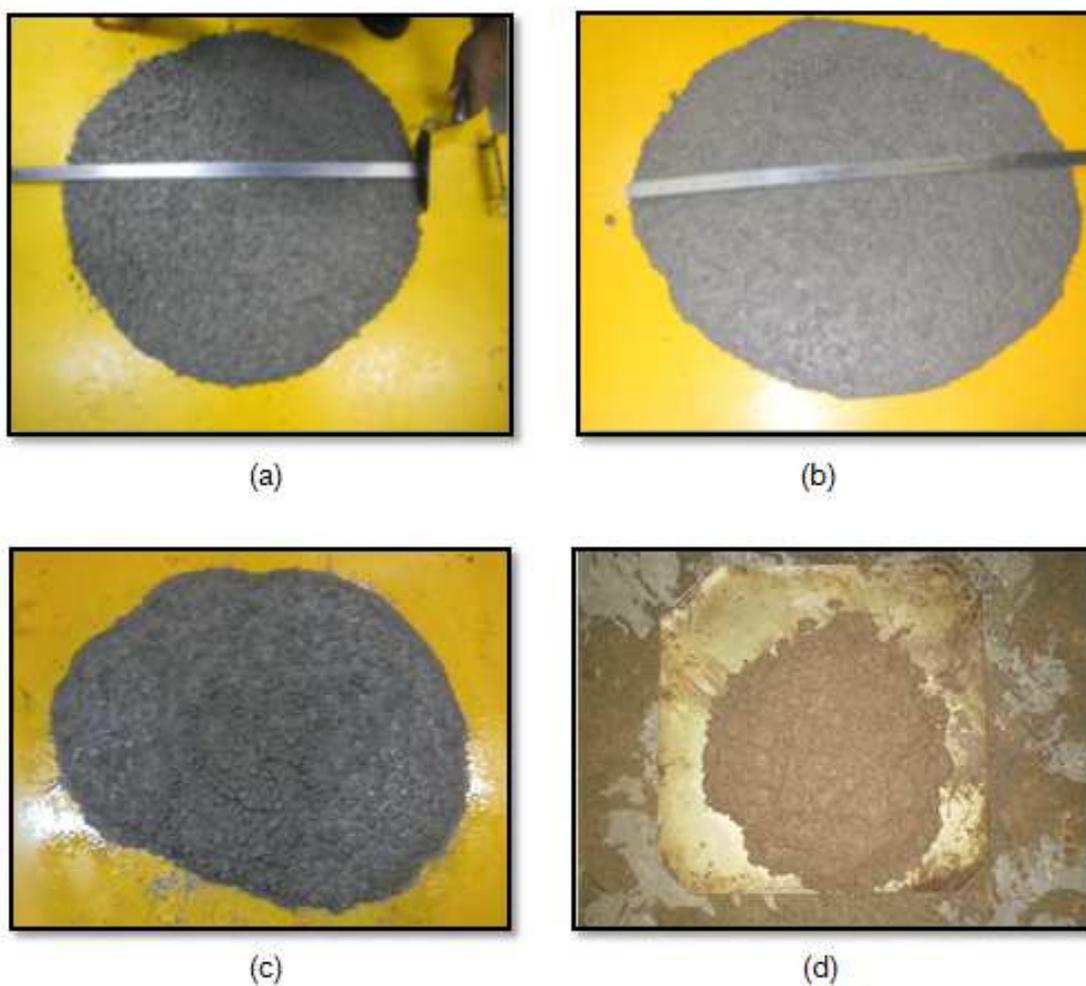


Figura 25 - Ensaio de abatimento e espalhamento de tronco do cone para as misturas: (a) CLAA 1000 (GRABOIS, 2012); (b) CLAA 7030 (GRABOIS, 2012); (c) CRTB 1000; e (d) CRTB 7030.

5.2. Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores médios de índice de vazios, absorção total de água e massa específica dos concretos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Misturas	Propriedades físicas		
	Absorção total	Índice de vazios	Massa específica
	A (%)	I (%)	γ (kg/m ³)
CRTB 1000	8,9 (\pm 0,4)	17,8 (\pm 0,1)	2004 (\pm 0,4)
CRTB 7030	8,6 (\pm 4,1)	17,0 (\pm 4,2)	1977 (\pm 0,1)

Foi possível observar que os valores de absorção total de água e índice de vazios foram superiores em relação às misturas de concreto leve de argila expandida. Essa variação foi de cerca de 128% e 178% para a mistura CRTB 1000 em relação a mistura CLAA 1000 e 59% e 93% para a mistura CRTB 7030 em relação a mistura CLAA 7030, respectivamente. Esse comportamento já era esperado, pois, de acordo com Santiago (2008), a maior porosidade dos agregados reciclados potencializa o aumento do volume total de poros acessível à água, aumentando também a porosidade dos concretos reciclados. Esse aumento também é influenciado pela angularidade dos agregados reciclados de cerâmica, que conseqüentemente gera uma maior absorção total de água por parte do concreto reciclado.

Com relação aos valores de massa específica, observou-se um aumento em comparação com os valores obtidos para concretos leves com agregados de argila expandida. Esse comportamento já era previsível, devido à substituição dos agregados leves nos traços de referência por agregados reciclados de tijolos cerâmicos, que apesar de apresentarem valores de massa específica inferiores aos de agregados convencionais, não podem ser classificados como agregados leves.

É importante ressaltar que, apesar do índice de vazios do concreto reciclado ser maior que o do concreto leve, a sua massa específica também é maior. Essa contradição pode ser explicada pela maior quantidade de poros acessíveis à água do agregado reciclado, que fornece a falsa impressão de que ele é mais poroso que a argila expandida.

Em comparação com o concreto convencional CAA 40, os concretos reciclados apresentaram valores inferiores de massa específica. Para o concreto CRTB 1000, essa redução foi de 16% e para o concreto CRTB 7030 essa redução foi de aproximadamente 18%.

Além disso, é possível observar que os valores de massa específica dos concretos reciclados encontram-se no limite superior estabelecido para concretos leves, que é igual a 2000 kg/m³, de acordo com EUROCODE 2 (2007).

Segundo Latterza e Machado Jr. (1999) *apud* Leite (2001), a utilização de agregados reciclados provoca a diminuição dos valores de massa específica do concreto em relação ao concreto convencional, devido a menor massa específica apresentada pelo agregado reciclado e por uma quantidade maior de vazios incorporada ao concreto com este material. Esta influência do agregado reciclado sobre a massa específica do concreto acaba conferindo-lhe valores tais que o concreto produzido fica situado no limite entre o concreto leve e o convencional.

Para concluir a avaliação das propriedades físicas dos concretos, as seções transversais e longitudinais de corpos-de-prova cilíndricos são apresentadas nas Figura 26 e Figura 27.

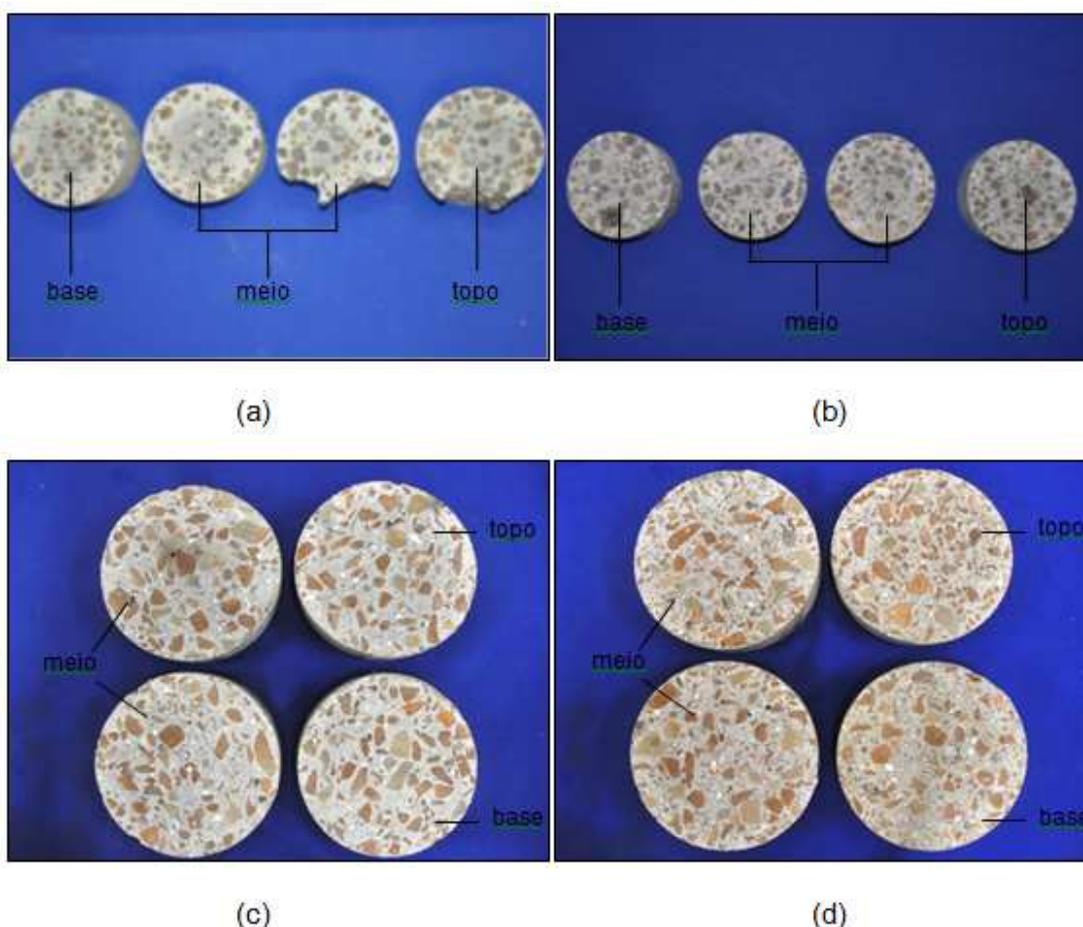


Figura 26 – Seções transversais dos corpos-de-prova, divididos em topo, meio e base das misturas: (a) CLAA 1000 (GRABOIS, 2012); (b) CLAA 7030 (GRABOIS, 2012); (c) CRTB 1000; e (d) CRTB 7030.

É possível observar que a distribuição dos agregados ao longo das amostras ocorreu de forma uniforme e sem a ocorrência de segregação tanto nas seções transversais quanto nas longitudinais.

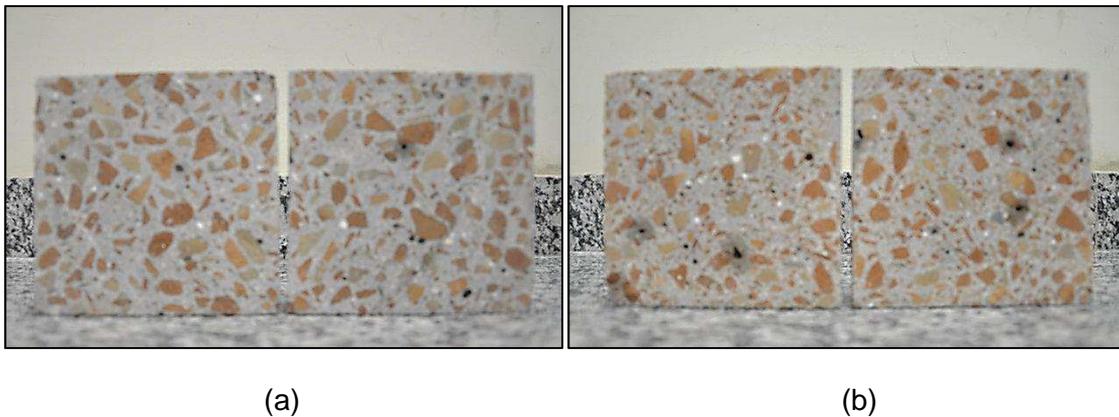


Figura 27 – Seção longitudinal dos corpos-de-prova cilíndricos das misturas: (a) CRTB 1000; e (b) CRTB 7030.

5.3. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

A resistência à compressão axial do concreto é uma das propriedades mais importantes, quando se avalia o desempenho mecânico de uma estrutura. Isto porque os resultados da resistência à compressão servem de parâmetro para analisar todas as outras propriedades. É a partir da resistência à compressão que se define se um concreto é estrutural ou não, sendo determinante para especificar ou limitar o seu uso (SANTIAGO, 2008).

Os concretos estudados foram submetidos a esforços de compressão após 1, 3, 7 e 28 dias de cura, sendo que as três primeiras idades tinham como objetivo apenas determinar a carga de ruptura dos corpos-de-prova, enquanto que, aos 28 dias, o objetivo era também analisar o comportamento da curva tensão versus deformação, através do emprego de transdutores elétricos (LVDT) para medição dos deslocamentos longitudinais.

Os resultados de resistência à compressão (f_c) e deformação axial (ϵ_u) referentes à tensão de ruptura dos concretos aos 28 dias, além do módulo de elasticidade (E) são apresentados na Tabela 13. As curvas típicas tensão *versus* deformação dos concretos leves e do concreto convencional, produzidos por Grabois (2012), são apresentadas na Figura 28, enquanto que as curvas típicas dos concretos reciclados produzidos nesse estudo são apresentados na Figura 29.

Tabela 13 - Valores médios das propriedades mecânicas sob esforços de compressão dos concretos aos 28 dias, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).

Misturas	Propriedades		
	Ruptura		
	ϵ_u ($\mu\epsilon$)	f_c (MPa)	E (Gpa)
CRTB 1000	2723,7 (\pm 1,7)	35,7 (\pm 4,5)	21,4 (\pm 5,7)
CRTB 7030	2653,5 (\pm 2,9)	32,7 (\pm 2,1)	18,6 (\pm 5,2)

Foi possível observar que a substituição do agregado graúdo leve pelo agregado reciclado não apresentou alterações significativas nos valores de resistência à compressão do concreto CRTB 1000. Enquanto que a substituição total do agregado graúdo aliada a substituição parcial do agregado miúdo leve por agregados reciclados representou uma diminuição de 12% no valor da resistência à compressão do concreto CRTB 7030 em comparação ao concreto CLAA 7030. Essa alteração nos valores de resistência pode ser explicada pelo aumento do fator água/material cimentício dos concretos reciclados em relação aos concretos leves para melhorar a sua trabalhabilidade. Segundo Leite (2001), essa alteração provoca um enfraquecimento progressivo da matriz de concreto devido ao aumento da porosidade, e assim, ocorre a diminuição da resistência. Além disso, a diminuição no consumo de cimento nos concretos reciclados também pode ter provocado essas reduções nos valores de resistência, devido ao enfraquecimento da pasta de cimento, tornando-a parte mais frágil do concreto.

Com relação a deformação dos concretos no momento da ruptura, é possível observar que houve um aumento considerável tanto no concreto CRTB 1000 quanto no CRTB 7030. Em ambos os concretos, esse aumento representou uma alteração de cerca de 40% no valor da deformação quando comparado com o concreto leve. Já o módulo de elasticidade do concreto reciclado com 100% de agregado graúdo reciclado e 100% de agregado miúdo natural (CRTB 1000) apresentou o mesmo valor quando comparado com o concreto CLAA 1000. Isso mostra que, apesar da substituição do agregado graúdo leve pelo agregado graúdo reciclado alterar os valores de resistência à compressão e deformação de pico, o valor do módulo de elasticidade permanece constante. Porém, é possível observar que no concreto CRTB 7030, o valor de módulo de elasticidade apresenta uma redução de 3,4 GPa (cerca de 15%). Esse fato pode ser explicado pelo aumento da porosidade do concreto por causa da utilização de agregados reciclados, pois segundo Leite (2001), quanto maior o teor de substituição dos agregados, e quanto menor a resistência dos concretos, maiores são as reduções observadas no módulo do concreto reciclado em relação ao de referência.

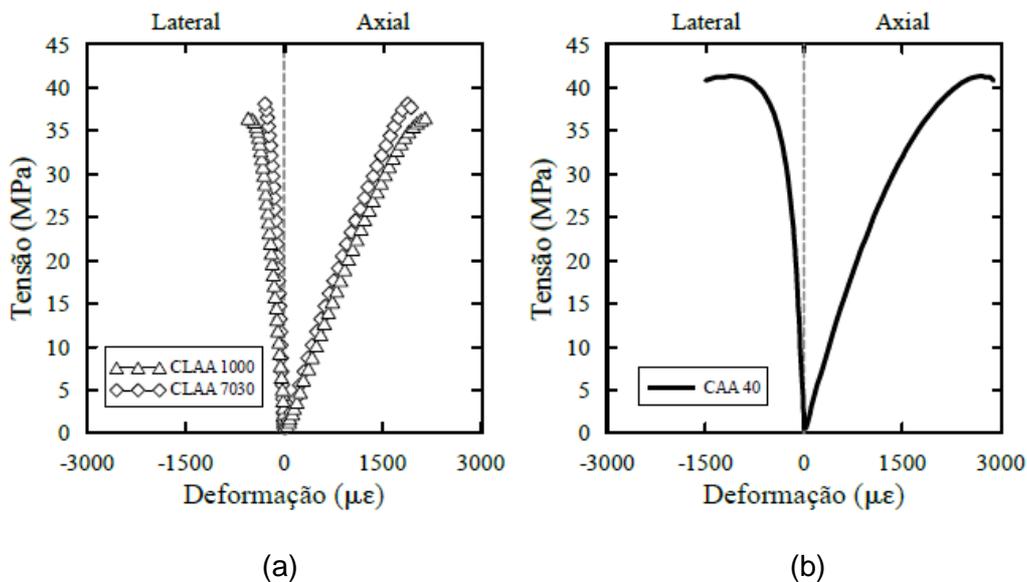


Figura 28 – Curvas típicas tensão *versus* deformação aos 28 dias, (a) CLAA 1000 e CLAA 7030 (GRABOIS, 2012); (b) CAA 40 (GRABOIS, 2012).

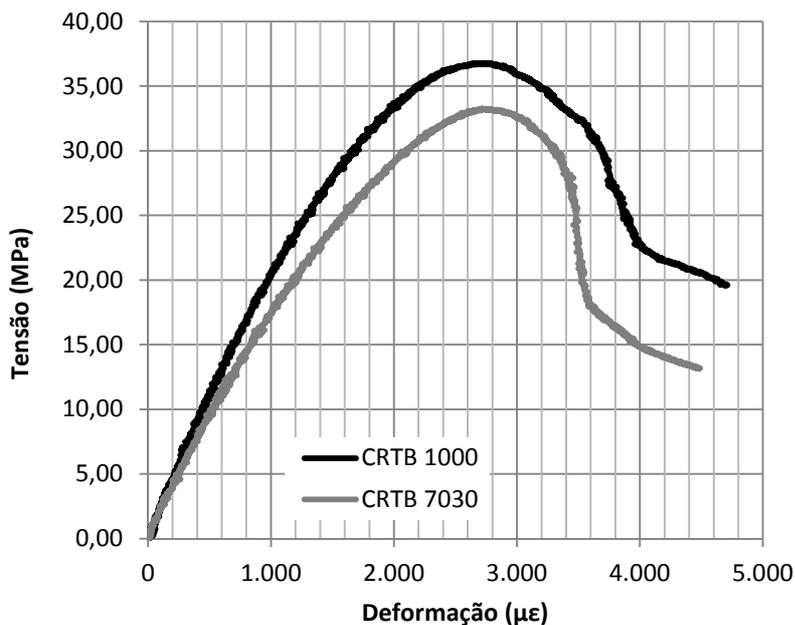


Figura 29 - Curvas típicas tensão *versus* deformação aos 28 dias dos concretos reciclados CRTB 1000 E CRTB 7030.

Analisando o comportamento das curvas de tensão *versus* deformação dos concretos reciclados, observou-se que o trecho linear é de cerca de 48% e 52% da carga de ruptura para as misturas CRTB 1000 e CRTB 7030, respectivamente. Nos concretos leves CLAA 1000 e CLAA 7030, esse trecho representa cerca de 58% e 62% da carga máxima, enquanto que no concreto convencional CAA 40, esse trecho apresenta um

valor em torno de 35%. Também é possível observar que a deformação de pico dos concretos reciclados apresentou valores próximos à deformação do concreto convencional, enquanto que as deformações dos concretos leves foram quase 40 % menores.

Também foram avaliados os valores médios de resistência à compressão nas quatro idades analisadas. Esses valores são apresentados na Tabela 14 e a Figura 30 ilustra o ganho de resistência para cada mistura ao longo do tempo.

Tabela 14 - Valores médios de resistência à compressão dos concretos à 1, 3, 7 e 28 dias de cura com os respectivos coeficientes de variação (em %).

Misturas	Resistência à compressão (MPa)			
	Tempo de cura (dias)			
	1	3	7	28
CRTB 1000	14,8 (± 2,1)	24,3 (± 7,4)	30,9 (± 6,3)	35,7 (± 5,4)
CRTB 7030	14,6 (± 1,8)	24,5 (± 3,4)	29,3 (± 2,9)	32,7 (± 2,8)

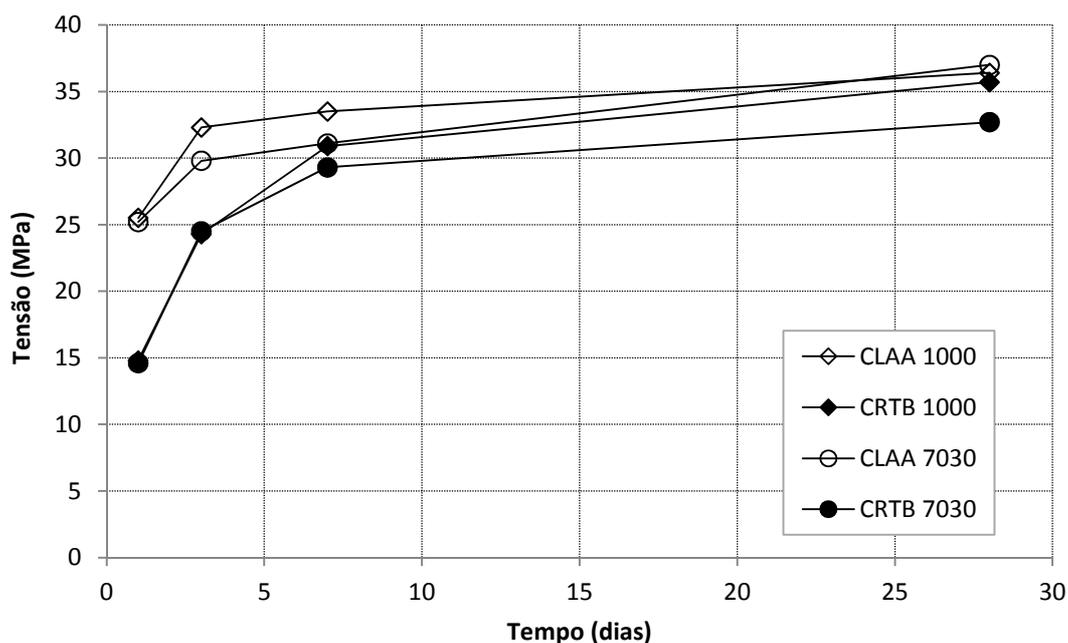


Figura 30 - Evolução da resistência à compressão dos concretos ao longo do tempo

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 na diminuição da sua porosidade (LEITE, 2001).

Devido à utilização de um tipo de cimento cuja principal característica é a alta resistência inicial, os concretos CRTB 1000 e CRTB 7030 atingiram valores de 14,8 e 14,6 MPa com apenas 1 dia de idade, o que equivale a 41% e 45%, respectivamente, da resistência obtida aos 28 dias. Aos 3 dias de idade, os concretos CRTB 1000 e CRTB 7030 apresentaram acréscimos de resistência equivalentes a 9,5 e 9,9 MPa, atingindo 68% e 75%, respectivamente, da resistência obtida ao final do processo. Já na avaliação aos 7 dias, a variação dos valores de resistência foi de 6,6 e 4,8 MPa para os concretos CRTB 1000 e CRTB 7030, atingindo 87% e 90%, respectivamente, da resistência final com apenas uma semana de idade. Em comparação com os concretos leves CLAA 1000 e CLAA 7030, o ganho de resistência dos concretos reciclados ocorreu de forma mais lenta, principalmente nas idades de 1 e 3 dias. Contudo, aos 7 dias de idade, todos os concretos, sendo eles reciclados, leves ou convencional, já tinham atingido pelo menos 85% da resistência obtida aos 28 dias de cura úmida.

De acordo com Evangelista (1996), fator de eficiência é a relação entre resistência à compressão (em MPa) e a massa específica seca (em kg/dm³) do concreto. Os valores de fator de eficiência dos concretos estudados estão presentes na Tabela 15. De forma a ilustrar esses resultados é apresentado um gráfico na Figura 31.

Os valores de fator de eficiência dos concretos reciclados CRTB 1000 e CRTB 7030 se mostraram semelhantes ao valor obtido por Grabois (2012), para o concreto de massa específica convencional. Esses valores ficaram em torno de 18 MPa.dm³/kg. Em comparação aos concretos leves em estudo, os valores de fator de eficiência dos concretos reciclados apresentaram valores inferiores, sendo aproximadamente 20% menores.

Tabela 15 - Valores médios de resistência à compressão, massa específica e o fator de eficiência dos concretos aos 28 dias.

Misturas	Propriedades		
	f _c (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)
CRTB 1000	35,7	2004	18
CRTB 7030	32,7	1977	17

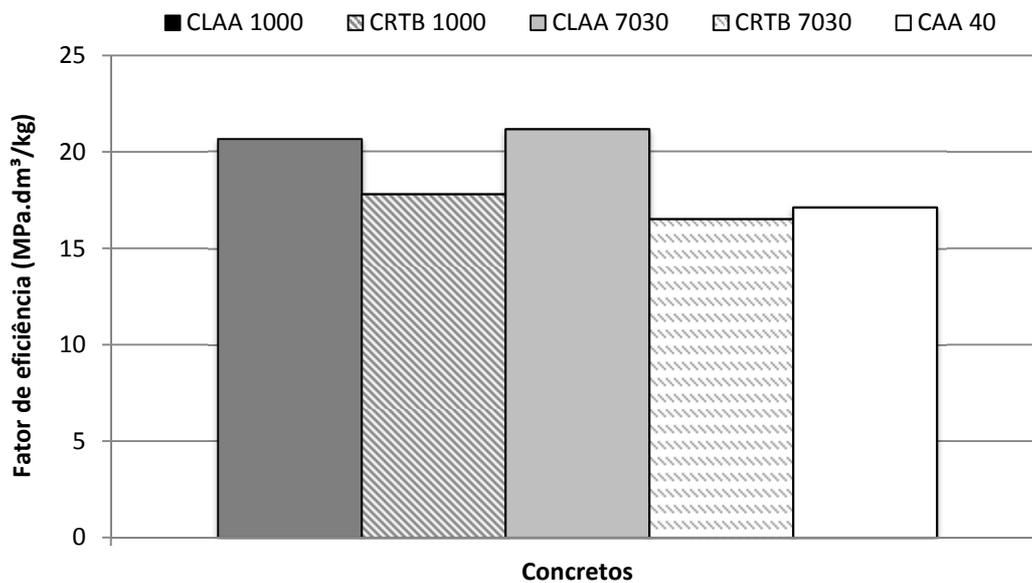


Figura 31 - Valores de fator de eficiência dos concretos aos 28 dias de cura.

Para concluir o estudo de caracterização mecânica sob esforços de compressão dos concretos reciclados, é apresentada uma imagem do concreto CRTB 1000 (Figura 32) utilizada para representar o modo de ruptura dos corpos-de-prova.



Figura 32 - Modo de ruptura dos concretos reciclados, exemplificado pelo CRTB 1000

5.4. Resistência à tração direta

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 (LEITE, 2001).

O comportamento sob esforços de tração direta dos concretos estudados foi avaliado aos 28 dias de cura úmida. Os valores obtidos para deformação de pico, módulo de elasticidade, carga e tensão de ruptura para os concretos são apresentados na Tabela 16 e as curvas típicas de tensão *versus* deformação dos concretos leves e dos concretos reciclados são apresentados nas Figura 33 e Figura 34, respectivamente.

Tabela 16 - Valores médios das propriedades mecânicas sob esforços de tração direta dos concretos aos 28 dias, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses).

Propriedades				
Misturas	ϵ_t ($\mu\epsilon$)	E_t (GPa)	P_{1af} (kN)	σ_{1af} (MPa)
CRTB 1000	132,8 (\pm 13,0)	23,0 (\pm 7,2)	9,1 (\pm 3,0)	2,4 (\pm 3,0)
CRTB 7030	170,9 (\pm 7,6)	19,5 (\pm 10,8)	10,8 (\pm 8,1)	2,9 (\pm 8,1)

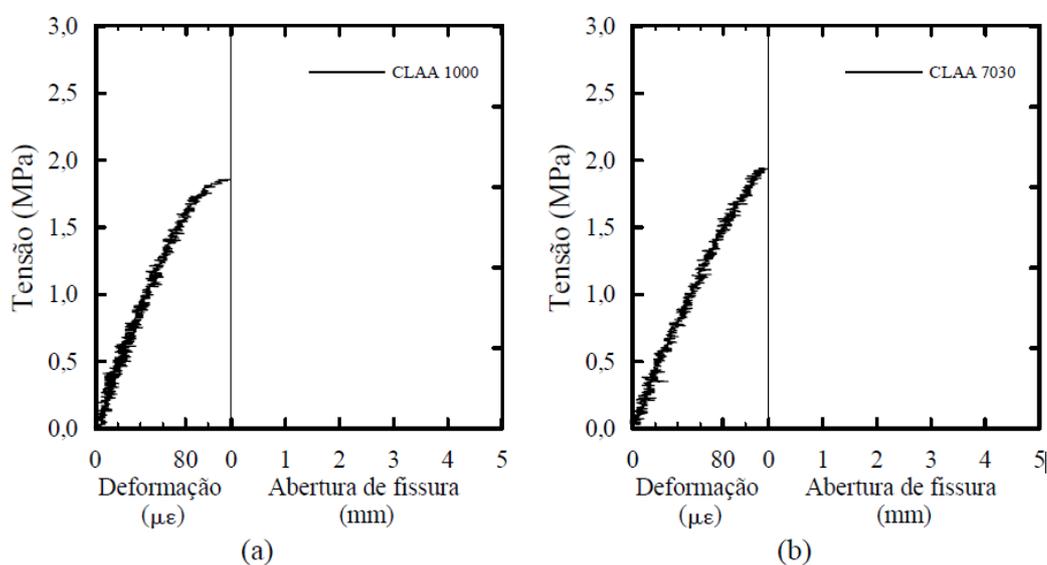


Figura 33 - Curvas típicas de tensão versus deformação dos concretos leves: (a) CLAA 1000 (GRABOIS, 2012); (b) CLAA 7030 (GRABOIS, 2012).

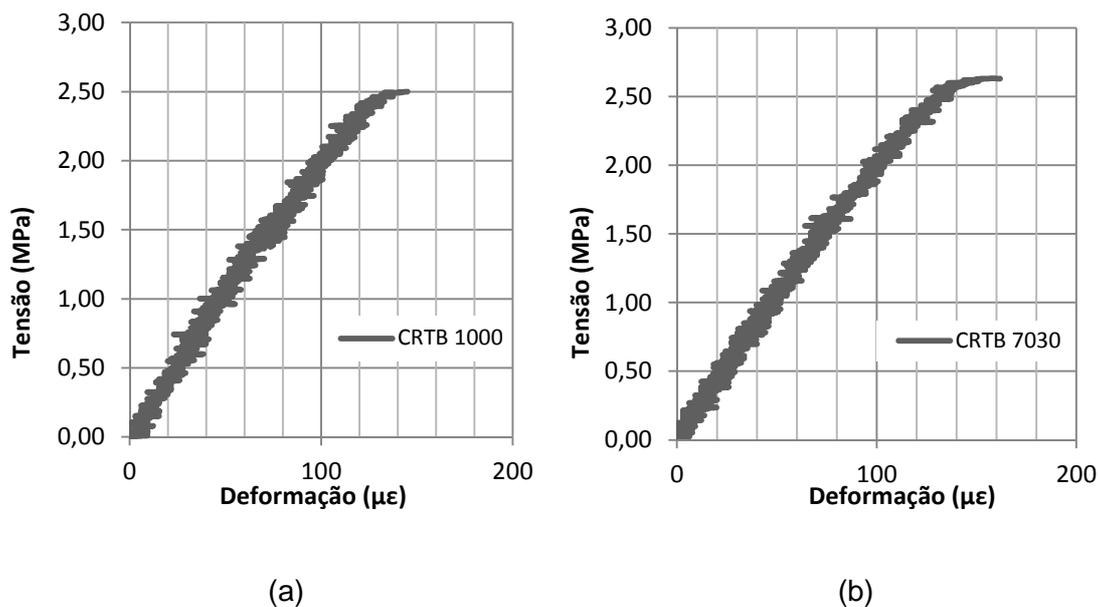


Figura 34 - Curvas típicas de tensão versus deformação dos concretos reciclados: (a) CRTB 1000; (b) CRTB 7030.

Foi possível observar que os concretos reciclados CRTB 1000 e CRTB 7030 apresentaram valores de resistência à tração superiores aos valores obtidos por Grabois (2012) para os concretos leves. Esse aumento é equivalente a 26% e 53% para os concretos CRTB 1000 e CRTB 7030, quando comparados com CLAA 1000 e CLAA 7030, respectivamente. Este fato pode ser explicado pela boa aderência entre a pasta e o agregado reciclado.

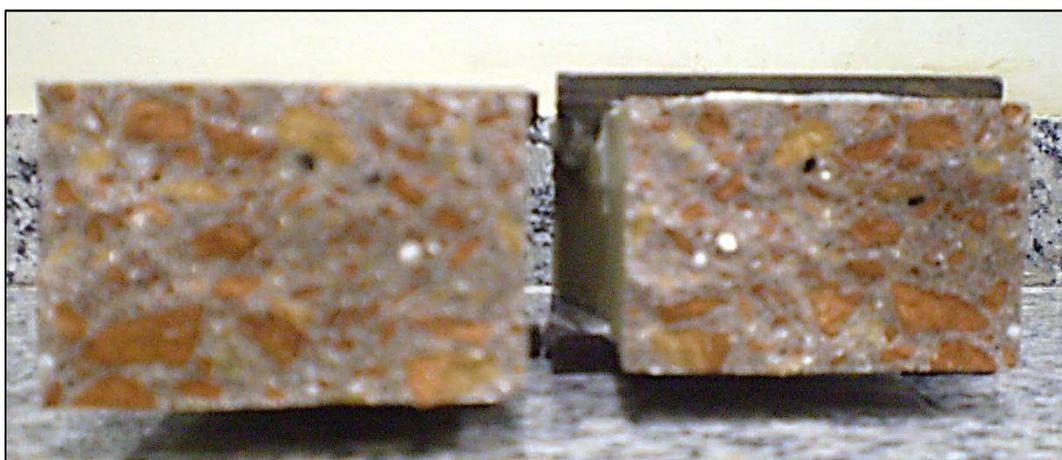
Além disso, a deformação de pico dos dois concretos reciclados também apresentaram um aumento quando comparado com o concreto leve de referência, sendo este valor equivalente a cerca de 19% e 61% para os concretos CRTB 1000 e CRTB 7030, respectivamente.

Com relação ao módulo de elasticidade dos concretos reciclados obtido no ensaio de tração direta, os valores apresentaram-se semelhantes quando comparados com o módulo obtido no ensaio de compressão axial.

Para concluir o estudo de caracterização mecânica sob esforços de tração direta dos concretos reciclados, são apresentadas duas imagens do concreto CRTB 7030 (Figura 35) utilizada para representar o modo de ruptura dos corpos-de-prova.



(a)



(b)

Figura 35 – (a) e (b) Modo de ruptura dos concretos reciclados, exemplificado pelo CRTB 7030.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

Com o intuito de ampliar e incentivar o conhecimento na produção de novos materiais voltados para os conceitos de sustentabilidade, este estudo avaliou a utilização de resíduos cerâmicos, provenientes de tijolos maciços, como agregados em concretos. Essa é uma alternativa menos impactante ao meio ambiente, uma vez que reduz a utilização de recursos naturais para novas construções, propõe uma destinação mais adequada para os resíduos produzidos durante as construções e demolições e ainda pode reduzir custos na execução de concretos leves.

Nesse estudo, foram avaliadas algumas das propriedades físicas e mecânicas de concretos reciclados, onde um dos objetivos era verificar a viabilidade de se produzir concretos leves com agregados de resíduos cerâmicos, devido à elevada porosidade desse tipo de agregado.

Com relação à trabalhabilidade, avaliada através do abatimento e espalhamento de tronco de cone, foi possível concluir que só se obteve uma mistura com elevada fluidez devido à utilização de um alto teor de superplastificante aliado ao aumento do fator água/material cimentício do traço-base. Notou-se que, quanto maior o teor de agregado reciclado, menor era a trabalhabilidade do concreto. É importante ressaltar que, apesar dessas modificações, observou-se uma excelente distribuição dos agregados por toda a matriz cimentícia, sem a ocorrência de segregação ou exsudação.

Os concretos reciclados apresentaram um grande aumento nos valores de índice de vazios com a substituição do agregado leve de argila expandida por agregado cerâmico, com destaque para o concreto CRTB 1000, com um aumento equivalente a 178%, em relação ao concreto leve. Essa propriedade proporcionou a redução da massa específica dos concretos reciclados, onde, apesar de não possuírem agregados leves, podem ser considerados concretos leves. Os valores de massa específica apresentaram-se no limite superior estabelecido para a classificação de concretos como leves, que é igual a 2000 kg/m³.

A compressão uniaxial dos concretos reciclados apresentou valores próximos aos concretos de referência, em torno de 35 MPa. Além disso, os concretos apresentaram um grande ganho de resistência nos primeiros dias de cura, sendo que aos 3 dias já tinha sido atingido aproximadamente 70% da resistência aos 28 dias de cura úmida. Este fato foi proporcionado pela utilização de um tipo de cimento com alta resistência inicial. O fator de eficiência dos concretos reciclados foi semelhante ao encontrado para o concreto convencional e inferior aos valores obtidos para os concretos leves, ambos disponíveis na literatura.

O comportamento dos concretos reciclados, sob esforços de tração direta aos 28 dias de cura úmida, apresentou um aumento nos valores de resistência quando comparados aos valores obtidos para os concretos leves. Isso pode ser explicado pela boa aderência entre a pasta e o agregado reciclado.

De modo geral, conclui-se que o uso de agregados cerâmicos reciclados é viável para o desenvolvimento de concretos, pelo menos com relação às propriedades mecânicas avaliadas. Para comprovar a viabilidade total da utilização deste agregado, seria

necessária a realização de outros ensaios para análise de outras propriedades físicas, térmicas e reológicas.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram investigadas as propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição, em comparação com as propriedades de um concreto leve produzido com agregados de argila expandida. Contudo, seria relevante a avaliação das propriedades térmicas e a análise mais aprofundada do comportamento reológico do concreto reciclado, acrescentando ensaios como teor de ar aprisionado e fluidez no funil “V” ao estudo para melhor caracterizar o novo material desenvolvido. Ademais, seria importante estudar a microestrutura do concreto com agregado reciclado, através da análise em MEV, avaliando o comportamento da interface pasta/agregado e sua influência nas propriedades mecânicas.

Além disso, seria interessante realizar a caracterização dos agregados reciclados de forma mais abrangente, incluindo ensaios de resistência à compressão dos grãos, abrasão Los Angeles e teor de material pulverulento, bem como de um estudo microscópico para avaliar a forma e a rugosidade dos grãos.

Como sugestão, também seria importante avaliar a viabilidade econômica do uso de agregados reciclados em concretos, considerando os custos com gerenciamento e implantação de programas de reciclagem de resíduos na produção de concretos reciclados, em comparação com o custo da produção de concretos convencionais.

Para aprofundar o desenvolvimento de concretos leves estruturais com uso de agregados reciclados, sugere-se a utilização de agregados leves de argila expandida como substituto parcial dos agregados graúdos reciclados para a produção de um concreto com massa específica inferior a obtida no presente trabalho. Desta forma, seria possível produzir um concreto mais leve e com material reciclado, contribuindo com a preservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. A., 2012, "*Influência de agregados miúdos reciclados de argamassas no comportamento mecânico de argamassas de cimento Portland*". Projeto de graduação. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2003, ACI Committe 213R-03. "*Guide for Structural Lightweight- Aggregate Concrete*". Detroit, American Concrete Institute.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 330-09. "*Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*". Philadelphia, USA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 331-10. "*Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units*". Philadelphia, USA, 2010.

ÂNGULO, S. C., 2000, "*Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*". Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo.

ÂNGULO, S. C., 2005, "*Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos*". Tese de doutorado. São Paulo, Universidade de São Paulo.

ARMELIN, H. S.; LIMA, M. G.; SELMO, S. M. S., 1994, "*Alta resistência com argila expandida*". *Revista Ibracon*, n.09, p.42-47.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, *Solo ou agregado miúdo – Determinação do equivalente de areia*, NBR 12052, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998, *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*, NBR NM 67, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001, *Agregado miúdo – Determinação da absorção de água*, NBR NM 30, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, *Agregados – Determinação da composição granulométrica*, NBR NM 248, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos*, NBR 15116, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, *Resíduos sólidos – Classificação*, NBR 10004, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*, NBR 9778, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, *Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio*, NBR 7809, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*, NBR 5739, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, *Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*, NBR 8522, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, *Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*, NBR NM 53, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*, NBR NM 52, Rio de Janeiro.

BERNARDES, A.; THOMÉ, A.; PRIETTO, P. D. M.; ABREU, A. G., 2008, “*Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS*”. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v.8, n.3, p. 65-76, jul./out. 2008.

BUTTLER, A. M., 2003, “*Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*”. Dissertação de mestrado. São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

CAPELLO, G., 2006, "*Entulho vira matéria prima: agregados reciclados chegam aos canteiros das construtoras, adquiridos de empresas especializadas ou gerados na própria obra*". Revista Técnica. São Paulo, Editora Pini, ano 14, n. 112, p. 32-35, jul. 2006.

CARRIJO, P. M., 2005, "*Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*". Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, 2002, *Resolução nº 307*, 5 de julho de 2002.

CORDEIRO, G. C., 2006, "*Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto*". Tese de doutorado. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

ESCSI – EXPANDED SHALE, CLAY AND SLATE INSTITUTE, 1971, "*Lightweight concrete: history, applications and economics*". USA, ESCSI, 43p..

EVANGELISTA, A. C. J., 1996, "*Produção e propriedades de concretos leves de alta resistência*". Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

EVANGELISTA, A. C. J.; ALMEIDA, V. C.; CORDEIRO, A. C.; ALVES, L. S.; RODRIGUES, R. A., 2006, "*Aplicação de resíduo cerâmico como adição mineral na produção de argamassas e concretos*". Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n.3, p. 8-12, abril. 2006.

GRABOIS, T. M., 2012, "*Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos leves autoadensáveis reforçados com fibras de sisal e aço*". Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

HANSEN, T. C., 1992, "*Recycled of demolished concrete and masonry*". London, Chapman & Hall, 316 p., Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

JOHN, V. M., 2000, "*Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento*". Tese de Livre Docência. São Paulo, Universidade de São Paulo.

- LEITE, M. B., 2001, *“Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição”*. Tese de doutorado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LIMA, J. A. R., 1999, *“Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos”*. Dissertação de mestrado. São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M., 2008, *“Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais”*. São Paulo, IBRACON, tradução da 3ª edição em inglês, v.1:III, p. 161.
- MENDES, H., CARVALHO, K. M. B., BORGES, T. E., 2012, *“Tijolos e Alvenaria: no âmbito da construção civil”*. Itabuna, Faculdade de Tecnologia e Ciência – FTC.
- MENEZES, M. D.; PONTES, F. V. M.; AFONSO, J. C., 2011, *“Panorama dos resíduos de construção e demolição”*. Revista de Química Industrial, Rio de Janeiro, p. 17-21, 4º trimestre, 2011.
- MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D., 2009, *“A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986 – 2008”*. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v.9, n.1, p. 57-71, jan./mar. 2009.
- PINTO, T. P., 1999, *“Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana”*. Tese de doutorado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- RICCI, G., 2007, *“Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação”*. Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- ROSSIGNOLO, J. A., 2003, *“Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura”*. Tese de doutorado. São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- ROSSIGNOLO, J. A., 2009, *“Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações”*. São Paulo, PINI.
- SALSA, C., 2009, *“Geração de resíduos de construção civil: desafios e soluções”*. Disponível em < <http://www.ecodebate.com.br/2009/05/18/geracao-de-residuos-de-construcao-civil-desafios-e-solucoes-artigo-de-carol-salsa/>>. Acesso em novembro de 2012.

SANTIAGO, E. Q. R., 2008, "*Utilização de agregados de EVA e RCD para a obtenção de concretos leves*". Dissertação de mestrado. Feira de Santana, Universidade Estadual de Feira de Santana.

SILVA, V. G., 2000, "*Avaliação do desempenho ambiental de edifícios*". Qualidade na Construção, SindusCon SP, n. 25, p. 14-22, Ano III, 2000.

SPITZNER, J., 1994 "High-strength LWA concrete". In: *High-Strength Concrete*. RILEM Cap.II – Aggregates.

TENÓRIO, J. J. L., 2007, "*Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais*". Dissertação de mestrado. Maceió, Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia.

VELASCO, R. V., 2008, "*Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas*". Tese de doutorado. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

WELLENKAMP, F. J., 1999, "*Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão*". In: Série Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, CETEM.

ZORDAN, S. E., 1997, "*A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto*". Dissertação de mestrado. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.