



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
COM INCORPORAÇÃO DA FRAÇÃO MIÚDA DA
BRITAGEM DE CONCRETO**

SIMONE HEINECK

São Leopoldo, Fevereiro de 2012.

SIMONE HEINECK

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
COM INCORPORAÇÃO DA FRAÇÃO MIÚDA DA
BRITAGEM DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

Co-Orientadora: Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Banca examinadora: Prof. Dr. Vanderley Moacyr John

Prof^a. Dra. Ângela Borges Masuero

São Leopoldo, Fevereiro de 2012.

Ficha catalográfica

H468d Heineck, Simone
Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto / por Simone Heineck. – 2012.
132 f. : il., 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.
Orientação: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak ;
Coorientação: Prof^a Dr^a Marlova Piva Kulakowski.

1. Argamassa - Revestimento. 2. Reciclagem. 3. Agregado miúdo reciclado de concreto. I. Título.

CDU 691.32

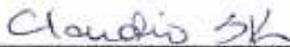
Catálogo na Fonte:
Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

SIMONE HEINECK

**“DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
COM INCORPORAÇÃO DA FRAÇÃO MIÚDA DA
BRITAGEM DE CONCRETO”**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 18 de maio de 2012.



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Orientador

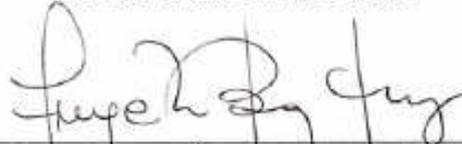


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Coordenador do PPGE/UNISINOS

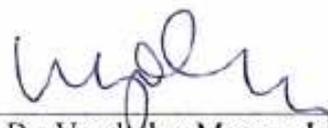


Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Angela Borges Masuero



Prof. Dr. Vanderley Moacyr John

Dedico este trabalho a minha filha Mariah que
está a caminho para iluminar a minha vida.

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que contribuíram para a realização desta pesquisa gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

A Deus, que esteve ao meu lado, protegendo-me e guiando-me em todos os momentos da vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cláudio de Souza Kazmierczak, pela confiança e reconhecimento do meu trabalho desde o início, mediante uma orientação competente e provedora de conhecimentos, durante toda a sua realização e pela amizade que juntos construímos.

A minha co-orientadora Prof^a. Dra. Marlova Piva Kulakowski, pela disponibilidade e dedicação pelas ricas e construtivas críticas ao trabalho, pelas contribuições durante o desenvolvimento do trabalho e pela amizade que juntas construímos.

Aos Professores do Mestrado, Jane, Carlos Moraes, Feliciane, Andréa, Luciana Gomes, Luis Miranda, Marco Aurélio que compartilharam pacientemente o seu vasto conhecimento permitindo avanços não só no desenvolvimento do trabalho, mas na vida pessoal.

A todos os colegas de pós-graduação, Carine, Pamela, Fernanda, Daniel, Mônica, Guilherme, Arlete e Joice, pela rica convivência, amizade e apoio. E em especial as minhas grandes amigas: Karina (Kari), que no decorrer do curso estivemos sempre juntas nos trabalhos, nos momentos de angústia e descontração, nas conversas incessantes de trabalho, estudos, família e viagens; Joana (Jô), que também dividiu comigo grande parte das tarefas do trabalho, que me acolheu carinhosamente em sua casa e tornou-se minha grande companheira de conversas noturnas e matinais. Kari e Jô, amigas para sempre...

A todos os funcionários do laboratório de materiais de construção (LMC), Maurício, Rodrigo, Felipe e Daiana que foram verdadeiros companheiros durante todas as atividades experimentais e principalmente amigos, participando ativamente das minhas angústias, medos, e principalmente das minhas conquistas. Gostaria de agradecer em especial a minha querida amiga Daiana (Dai), que não mediu esforços a me auxiliar, sempre que possível. Muito obrigada pelo incansável incentivo, pela exigência, análise crítica e recomendações no decorrer de todo este trabalho.

Aos funcionários: Roque do Laboratório da Engenharia Mecânica da Unisinos, pelo desenvolvimento de equipamento para a realização da pesquisa e João do Laboratório de Construção pelo auxílio do quarteamento dos agregados reciclados.

Aos bolsistas Tiago, Nelson e Ezequiel, que me auxiliaram no ensaio de retração das argamassas (ensaio extinguido). Ao bolsista Daniel, que auxiliou na montagem dos agregados para a caracterização morfológica dos mesmos. Em especial, aos bolsistas Jeferson e Ezequiel que me auxiliou na caracterização física dos agregados de um modo geral e pela disponibilidade de ajudar sempre quando era possível.

Aos meus amados pais, Janeci Heineck e Ademar Antônio Kreutz Heineck...*duas virtudes, duas verdades, duas simplicidades, duas maneiras de encarar a vida e sobretudo, duas pessoas maravilhosas que não mediram esforços no apoio aos meus estudos...você são os grandes responsáveis pela minha formação moral e intelectual.*

Ao meu irmão Alexandre pelo incentivo e dedicação.

Ao meu grande amor, amigo e por acima de tudo companheiro Gustavo, sempre me apoiando nas decisões difíceis, pelas palavras de incentivo, pela confiança no meu potencial. Agradeço a Deus por você existir na minha vida.

Aos meus familiares, em especial, Lúcia e Aristides, que acreditaram no meu potencial, me ajudaram e me incentivaram sempre; Isa, Paulo, Ariádine e Bruno que me acolheram carinhosamente em São Leopoldo durante minha graduação e pós-graduação. A querida Vera Regina (tia Neca) pelo carinho, apoio, companheirismo e pelas valiosas discussões, ajudas incansáveis e incentivos.

Por fim, mas não com menos importância, a todos os meus amigos e amigas que acompanharam esta fase da minha vida e contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal. Obrigada pela amizade, pelos conselhos e pelo carinho demonstrado.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

CAPES - Bolsa de estudo concedida.

FINEP - Concessão de auxílio para a realização da pesquisa.

CNPq - Concessão de auxílio para a realização da pesquisa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	20
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	PANORAMA DOS RESÍDUOS DE CONCRETO	21
2.1.1	Geração dos resíduos de concreto	21
2.1.2	Estimativas de geração de RCD e de geração de RC	22
2.1.3	Normatização para reciclagem dos RC	26
2.1.4	Emprego de resíduo de concreto	27
2.2	AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	28
2.2.1	Beneficiamento dos resíduos de concreto para a obtenção de agregados	28
2.2.2	Características dos agregados reciclados provenientes de concreto	30
2.2.3	Propriedades físicas dos agregados reciclados de concreto	31
2.3	ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	40
2.3.1	Influência do agregado miúdo de concreto nas propriedades das argamassas	40
2.3.1.1	Argamassas no estado fresco	40
2.3.1.2	Argamassas no estado endurecido	40
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
3.1	MATERIAIS	54
3.1.1	Aglomerantes	54
3.1.2	Água	55
3.1.3	Agregados	55
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	56
3.2.1	Caracterização morfológica por análise de imagem	56
3.2.2	Caracterização da distribuição granulométrica	58
3.3	PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	68
3.4	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	70
3.4.1	Índice de consistência por espalhamento	71
3.4.2	Consistência por penetração de cone	71
3.4.3	Squeeze flow	72
3.4.4	Retenção de água	73
3.4.5	Teor de ar incorporado	74
3.4.6	Densidade de massa	75
3.5	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	75
3.5.1	Densidade de massa no estado endurecido	76
3.5.2	Resistência à tração na flexão	76
3.5.3	Resistência à compressão	77
3.5.4	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	77
3.5.5	Absorção de água por imersão, índices de vazios e massa específica	78
3.5.6	Módulo de Elasticidade dinâmico	78
3.5.7	Determinação da distribuição de poros - porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)	80
3.6	QUADRO QUANTITATIVO DE ENSAIOS REALIZADOS	80
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	82
4.1	FORMA DOS GRÃOS	82
4.2	DETERMINAÇÃO DA REATIVIDADE DOS ARC – MONITORAMENTO DA TEMPERATURA SEMI-ADIABÁTICA	87
4.3	RESUMO DOS ENSAIOS EM ARGAMASSAS	87
4.4	ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	88

4.4.1	<i>Teor de água e Índice de consistência das argamassas.....</i>	88
4.4.2	<i>Comportamento reológico das argamassas.....</i>	89
4.4.2.1	<i>Penetração de cone.....</i>	89
4.4.2.2	<i>Squeeze flow.....</i>	90
4.4.3	<i>Retenção de água.....</i>	93
4.4.4	<i>Densidade de massa no estado fresco.....</i>	95
4.4.5	<i>Teor de ar incorporado.....</i>	97
4.5	ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	98
4.5.1	<i>Densidade de massa.....</i>	98
4.5.2	<i>Resistência mecânica das argamassas.....</i>	99
4.5.3	<i>Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.....</i>	102
4.5.4	<i>Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.....</i>	104
4.5.5	<i>Módulo de elasticidade dinâmico.....</i>	105
4.5.6	<i>Porosimetria por intrusão de mercúrio.....</i>	106
5	CONCLUSÃO.....	109
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	110
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	110
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
	APÊNDICE A.....	127
	APÊNDICE B.....	128
	APÊNDICE C.....	129
	APÊNDICE D.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração e porcentagem reciclada dos RCD e RC.....	22
Tabela 2 - Comparativo da composição dos resíduos de construção e demolição em algumas cidades brasileiras.....	24
Tabela 3 - Caracterização física, química e mecânica do cimento Portland CP II Z – 32.	54
Tabela 4 - Caracterização física e química da cal hidratada CH I.....	55
Tabela 5 - Empacotamento dos grãos da AN.	60
Tabela 6 - Porcentagem de microfinos em cada fração dos agregados.	61
Tabela 7 - Teor de microfinos adicionado para cada agregado.	62
Tabela 8 - Valores típicos da caracterização por granulometria laser dos microfinos.	64
Tabela 9 - Caracterização física dos agregados.....	64
Tabela 10 - Argamassa aderida nos agregados.....	67
Tabela 11 - Ensaios realizados e quantitativo de corpos de prova.	81
Tabela 12 - Média das áreas e perímetros das projeções dos grãos.	82
Tabela 13 - Média das dimensões máximas das projeções dos grãos	82
Tabela 14 - Análise qualitativa dos grãos dos agregados miúdos.	84
Tabela 15 – Arredondamento dos agregados.	84
Tabela 16 - Esfericidade dos agregados.	85
Tabela 17 - Resumo dos resultados no estado fresco.	87
Tabela 18- Resumo dos resultados no estado endurecido.	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Projeções de grãos com formas variadas na fração 38 – 32 mm.....	33
Figura 2 - Microestrutura do concreto reciclado.....	35
Figura 3 - Padrões gráficos dos graus de esfericidade e arredondamento.	38
Figura 4 - Fluxograma do programa experimental.	53
Figura 5 - Amostra da AN, retida na peneira de abertura 1,2mm.	57
Figura 6 - Amostra do ARCT, retida na peneira de abertura 1,2mm.....	57
Figura 7 - Distribuição granulométrica – porcentagem retida nas peneiras.	58
Figura 8 - Distribuição granulométrica – porcentagem retida acumulada nas peneiras.	59
Figura 9 - Distribuição granulométrica dos microfios de AN.	63
Figura 10 - Distribuição granulométrica dos microfios de ARCC.	63
Figura 11 - Distribuição granulométrica dos microfios de ARCT.....	63
Figura 12 - Análise visual da rugosidade superficial dos grãos: (a) AN e (b) ARCT.	66
Figura 13 - Ensaio de caracterização do teor de argamassa aderida nos ARC: (a) imersão do ARC em água, após aquecimento em forno mufla; (b) desintegração agregado/argamassa com martelo de borracha; (c) imersão em ácido clorídrico; (d) material após ataque químico.....	67
Figura 14 – Índice de penetração do cone em função do teor de água adotado.....	70
Figura 15 - Etapas do ensaio de índice de consistência por espalhamento: (a) equipamento para realização do ensaio; (b) adensamento da argamassa no molde; (c) moldagem e rasamento do cone; (d) golpes; (e) medição do índice de consistência e; (d) 3 medições para a obtenção de média do índice de consistência.....	71
Figura 16 - Ensaio de penetração de cone: (a) equipamento utilizado para o ensaio e a argamassa devidamente preparada para a liberação do dispositivo cônico; (b) conjunto após a liberação do dispositivo cônico.....	72
Figura 17 - Ensaio de squeeze flow: (a) após a acomodação da pasta no molde, é feito o rasamento da superfície para que esta, possa tocar perfeitamente na placa superior do equipamento de ensaio; (b) remoção do gabarito; (c) e (d) amostra sem gabarito, sobre a placa inferior do equipamento de ensaio; (e) após encaixe da placa inferior na máquina, desce a placa superior até encostar na amostra, monitorando os valores de carga, para evitar a compactação do material antes do início efetivo do ensaio; (f) ensaio realizado com aplicação de carga.	73
Figura 18 – Procedimentos para o ensaio de retenção de água: (a) preparação da amostra através do adensamento da pasta com soquete; (b) rasamento com régua metálica.....	74
Figura 19 – Procedimentos do ensaio pressométrico: (a) adensamento da última camada com golpes distribuídos uniformemente; (b) inserção de água, através de uma das chaves na tampa até que a água saia pela chave oposta para eliminar o ar do interior do equipamento; (c) bombeamento de ar para a câmara até que o manômetro esteja na linha de pressão inicial; (d) estabilização do manômetro na linha de pressão inicial, por expulsão de ar.....	74
Figura 20- Moldagem dos CP prismáticos e cilíndricos: (a) e (c) preenchimento da argamassa na fôrma; (b) e (d) nivelamento da superfície.....	75
Figura 21 - Medição do CP para o ensaio de densidade de massa.....	76
Figura 22 - (a) corpo de prova antes da realização do ensaio de aplicação da carga; (b) corpo de prova posterior ao ensaio.....	76
Figura 23 - Corpo de prova antes (a) e após o ensaio de resistência à compressão (b).	77
Figura 24 - Absorção de água por capilaridade de argamassas.	78
Figura 25 - Absorção de água por imersão.	78
Figura 26 - Módulo de elasticidade dinâmico: (a) calibração; (b) porta-amostra e amostra; (c) execução do ensaio.....	79

Figura 27 - Posição da amostragem para o ensaio de determinação da distribuição de poros.	80
Figura 28 - Amostra dos grãos da AN, retida na peneira de abertura 1,2mm.	83
Figura 29 - Amostra dos grãos do ARCC, retida na peneira de abertura 1,2mm.	83
Figura 30 - Amostra dos grãos do ARCT, retida na peneira de abertura 1,2mm.	83
Figura 31 - Variação do arredondamento dos grãos das frações das areias.	85
Figura 32 - Variação da esfericidade dos grãos das frações das areias.	86
Figura 33 - Monitoramento da evolução da temperatura dos agregados em contato com água.	87
Figura 34 - Penetração de cone em função do tipo de agregado.	89
Figura 35 - Ensaio de squeeze flow nas argamassas.	90
Figura 36 - Retenção de água das argamassas com AN, ARCC e ARCT.	94
Figura 37 - Relação de retenção de água com os teores de água.	95
Figura 38 - Densidade de massa das argamassas no estado fresco.	96
Figura 39 - Teor de ar incorporado.	97
Figura 40 - Comparação dos resultados de teor de ar incorporado e penetração de cone.	98
Figura 41 - Resultados médios de densidade de massa.	99
Figura 42 - Resistências à compressão e à tração na flexão média das argamassas.	100
Figura 43 - Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.	103
Figura 44 - Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real.	104
Figura 45 - Módulo de elasticidade dinâmico.	105
Figura 46 - Volume de poros acumulados nas argamassas.	107
Figura 47 - Distribuição de poros das argamassas.	107

LISTA DE ABREVIATURAS

ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMRC	Agregado Miúdo Reciclado de Concreto
AN	Areia Natural
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARCC	Agregados Reciclados de Cura Convencional
ARCT	Agregados Reciclados de Cura Térmica
ASTM	American Society for Testing and Materials
BM	Britador de Mandíbulas
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CEMBUREAU	European Cement Association
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpos de Prova
IC	Índice de Consistência
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma MERCOSUL
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
RC	Resíduo de Concreto
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Éssais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da Seção Comprimida
a/c	Relação Água/Cimento
A_r	Arredondamento
CH I	Cal Hidratada
CP II Z – 32	Cimento Portland composto com pozolana, com área específica de 320 m ² /kg Blaine
D	Dimensão
d	Altura do Corpo de Prova
$d_{máx}$	Diâmetro Máximo de Feret
F_f	Carga Aplicada Verticalmente no Centro do prisma
F_c	Carga Máxima Aplicada no Prisma
F_f	Esfericidade
IC	Índice de Consistência
L	Distância entre os Pontos de Apoio
P	Perímetro da Projeção da Partícula
R_c	Resistência à Compressão
R_f	Resistência à Tração na Flexão
S	Área da Projeção da Partícula
t	Tempo
ν	Coefficiente de Poisson
v	Velocidade da Onda ultra-sônica
γ	Densidade de Massa no Estado Endurecido
#	Abertura de Malha da Peneira

RESUMO

HEINEK, S. **Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto**. São Leopoldo, 2012. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2012.

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais não renováveis, além de ser um dos principais geradores de resíduos sólidos urbanos (RSU). Dentre os diversos recursos naturais extraídos da natureza, os agregados utilizados na construção civil são os insumos minerais mais consumidos no mundo. Com a crescente restrição da extração de areias dos rios e a escassez de areias naturais é essencial que o setor da construção venha a adotar uma postura ambiental e sustentável, através de desenvolvimentos tecnológicos de processos de reciclagem de resíduos. Uma das alternativas para a construção civil, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, no abastecimento de areia para a construção é a substituição das areias extraídas dos rios (areia natural) por resíduos de concreto, para a produção de argamassas. Este estudo tem como objetivo principal avaliar o comportamento de argamassas de revestimento com incorporação de agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC), em substituição à areia natural extraída de rio (AN). Os AMRC foram obtidos a partir de resíduos de dois tipos de concreto empregados na pré-fabricação: de concreto submetido à cura térmica à vapor (ARCT) e outro de concreto submetido à cura convencional (ARCC). As argamassas foram confeccionadas com cimento CP II Z- 32 e cal CH-I, empregando-se traço em volume 1:1:6 com índice de consistência fixado em 260 ± 5 mm, para as três misturas de argamassas. O estudo foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira etapa foram analisadas a caracterização morfológica e a distribuição granulométrica das areias. Na etapa seguinte analisou-se o comportamento e características das argamassas no estado fresco e no estado endurecido. A análise das argamassas no estado fresco contemplou dados de índice de consistência, penetração de cone, squeeze flow, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado. No estado endurecido as propriedades estudadas foram densidade de massa, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade, absorção de água, índices de vazios, massa específica, módulo de elasticidade dinâmico e porosidade por intrusão de mercúrio. Verificaram-se diferenças significativas no comportamento das argamassas confeccionadas com os dois agregados reciclados. No estado fresco foi observado perda de trabalhabilidade; perda de densidade de massa; aumento de ar incorporado, com perdas mais expressivas para a mistura com ARCC. No estado endurecido observou-se redução da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão para as argamassas com ARCC. Os dados apontaram ainda diminuição de absorção de água por capilaridade; aumento da absorção de água por imersão; aumento do índice de vazios; aumento da massa específica e redução do módulo de elasticidade dinâmico para ambas as argamassas com agregados reciclados.

Palavras-chave: reciclagem; agregado miúdo reciclados de concreto; argamassas de revestimento.

ABSTRACT

HEINEK, S. **Performance of mortar coating with incorporation of the fine fraction of the crushing of concrete.** São Leopoldo, 2012. 132f. Dissertação (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

The construction industry is one of the sectors that consume non-renewable natural resources, besides being one of the main generators of municipal solid waste. Among the various natural resources extracted from nature, the aggregates used in construction are the most consumed mineral inputs in the world. With the increasing restriction of sand extraction from rivers and the scarcity of natural sands it is essential that the construction industry adopt an environmental and sustainable development, through technological processes to recycle waste. One of the alternatives to the construction industry, from an economical and environmental point of view, the supply of sand for construction is the replacement of sand extracted from rivers (natural sand) for concrete waste, for the production of mortars. This study aims at evaluate the behavior of rendering mortar with incorporation of recycled aggregate concrete, replacing the natural sand. The morphological characteristics and composition of two aggregates made from concrete were analysed: one from concrete subjected to thermal curing and other to conventional curing, compared with a river sand. Characterization tests were performed on fresh mortar (consistency index, cone penetration, squeeze flow, water retention, density and air content) and hardened mortar (density, compressive strength, flexural strength, capillarity water absorption and capillarity coefficient, water absorption, density, dynamic modulus of elasticity and mercury intrusion porosimetry). For this experiment were followed the requirements of NBR 13281 (ABNT, 2005) and used Brazilian CP II Z-32 cement and CH-I lime. A proportion of 1:1:6 (cement, lime and sand) by volume, with index consistency set at (260 ± 5) mm was adopted for the three mixtures of mortars. There were significant differences in the behavior of the two mortars made with recycled aggregates, such as: loss of workability; loss of density; increased air content (especially mixing with ARCC), in fresh stage. Reduction of compressive strength and reduced flexural strength (except in the mixture with ARCT), reduction of water absorption by capillarity, increased water absorption by immersion, an increase in the index of emptiness, increased density and reduced dynamic modulus of elasticity, in the hardened mortar.

Key-words: recycling, recycled concrete fine aggregate, rendering mortar.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da extração de recursos naturais, decorrente do acelerado processo de industrialização e da ocupação urbana, vem produzindo modificações na paisagem e provocando fortes impactos no meio ambiente. Leite (2001) coloca que o crescimento do setor da construção civil, devido a um panorama de expansão econômica, leva a um aumento na demanda de matéria prima e energia, e, por ingerência dos processos produtivos, a um aumento na geração de resíduos de construção e demolição. A Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC (2011) coloca que no período de 2004 a 2010 a Construção Civil nacional cresceu 42,41%, após longo período de estagnação, e que o PIB do setor em 2010 foi cerca de 165 bilhões de reais, o equivalente a 5,3% do PIB nacional. Logo, entre os diversos setores da economia, é possível dizer que o maior responsável pelo consumo de recursos naturais e, por conseqüência, o maior gerador de resíduos sólidos é o setor da construção civil.

Pinto e Gonzáles (2005), no Manual de Gestão de Resíduos da Construção Civil, enfatizam que a geração dos resíduos deste setor tem uma expressiva participação no conjunto dos resíduos produzidos, podendo alcançar 2 toneladas de entulho para cada tonelada de lixo domiciliar. O Manual também divulga pesquisa feita em 11 cidades brasileiras de grande porte cujos dados revelam que a geração de resíduos da construção civil representa 61% do resíduo urbano produzido.

A mineração de agregados para a construção civil produz grandes volumes de material, tem beneficiamento simples, baixo preço unitário e necessita ser produzido no entorno do local de consumo, geralmente em áreas urbanas. Este setor é o segmento da indústria mineral que comporta o maior número de empresas e trabalhadores e o único a existir em todos os estados brasileiros (LA SERNA, 2009).

Estima-se no Brasil que a extração de minerais seja de 320 milhões de metros cúbicos por ano, grande parte de forma ilegal (BASTOS, et al., 2005). A extração da areia natural acarreta sérios danos ao meio ambiente, especialmente no que concerne à extração em rios, uma vez que agride a sua calha natural, leva a um aumento da vazão da água e acelera o ritmo de erosão das margens.

Dentre os diversos recursos naturais extraídos, o Ministério de Minas e Energia (MME, 2012) menciona que os agregados utilizados na construção civil são os insumos minerais mais consumidos no mundo. Segundo a Associação Nacional das Entidades de

Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC, 2010) o consumo de agregados no Brasil é na ordem de 632 milhões de toneladas, cerca de 3,31 t/hab.

Conforme Buttler (2003) e Buttler (2007), os resíduos de concreto procedentes de atividades da construção civil e de demolições - desde que corretamente separados -, e aqueles oriundos de fábricas e usinas de concreto, têm um dos maiores potenciais de utilização como agregado reciclado, devido ao conhecimento de suas propriedades básicas (resistência à compressão, idade, etc.) e seu menor grau de contaminação por outros materiais, quando comparado com outros resíduos da construção. Essas características dos RC promovem seu emprego em aplicações de alto valor agregado, tais como, produção de concreto estrutural e elementos pré-moldados (POON et al., 2002; ETXEBERRIA et al., 2006; BUTTLER, 2007).

Diante do contexto abordado, é essencial que o setor da construção venha a adotar uma postura ambiental mais sustentável, através de desenvolvimentos tecnológicos de processos associados à reciclagem de RCD e RC, que passam a ter hoje uma enorme relevância.

A reciclagem de resíduos tem se mostrado uma alternativa eficaz na redução dos impactos causados pelo consumo desordenado de matéria-prima e pela disposição inadequada de resíduos. Neste sentido, a transformação destes em fonte alternativa de matéria-prima, dentro do próprio setor que os produziu, constitui um desafio para o meio técnico e científico.

As diversas pesquisas sobre a composição do RCD desenvolvidas por Jadovski (2005) permitem observar que a fração de concreto existente nos resíduos no Brasil pode representar de 7% a 21% do RCD. Sendo que em fábricas de pré-moldados de pequeno porte os números mostram cerca 2% do total produzido (BUTTLER, 2007). De acordo com esse índice abordado, este material acaba merecendo uma atenção especial como potencial resíduo a ser submetido à prática da reciclagem.

Uma das dificuldades com as quais a reciclagem se depara é a classificação e segregação dos constituintes dos resíduos de construção e demolição (RCD). O concreto é um dos materiais reciclados que mais favorecem ao benefício da qualidade e do custo dos agregados reciclados, por ser um material de fácil segregação durante o processo de demolição, evitando assim contaminantes no material. Logo, o potencial de reciclagem do concreto é bastante elevado, aumentando assim, o valor do resíduo de demolição (BUTTLER 2003; ANGULO, 2005; GONÇALVES, 2007).

Diante dos índices de geração de concreto e seu potencial para reciclagem, uma outra alternativa para o setor, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, no abastecimento de areia para a construção civil pode ser a substituição das areias extraídas dos rios (areia natural) por resíduos de concreto; logo, se teria uma produção de agregado reciclado de concreto (ARC).

As conseqüências desta substituição ainda são pouco conhecidas em termos de desempenho. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de estudos que venham a contribuir tanto na busca de soluções ambientais, quanto no conhecimento das propriedades dos materiais produzidos com a areia reciclada de concreto e, neste caso, com ênfase do seu uso em argamassas de revestimentos.

O presente trabalho propõe um estudo de desempenho das argamassas de revestimento com incorporação de agregado reciclado de concreto, visando avaliar a viabilidade técnica de substituição deste agregado reciclado pela areia natural.

1.1 JUSTIFICATIVA

A cadeia produtiva da construção civil é um dos setores da economia que mais origina empregos no país e contribui para minimizar o déficit habitacional. Em contrapartida, é um dos setores que mais consome recursos naturais não renováveis, além de ser um dos principais geradores de resíduos sólidos urbano (RSU).

Na ausência de espaços para descarte apropriado, as disposições irregulares de RCDs em locais inadequados causam significativo impacto ambiental ocasionando a contaminação do solo, da água e do ar comprometendo, assim, a qualidade de vida da população.

Dessa forma, o aproveitamento de resíduos sólidos é um instrumento para a redução dos impactos gerados pela indústria da construção e também uma boa alternativa do ponto de vista econômico, uma vez que a escassez de recursos naturais encarece o valor da matéria prima.

Importantes estudos têm sido realizados objetivando a reutilização dos agregados provenientes das construções e demolições. Alguns autores avaliaram o desempenho desses materiais em concreto como, Leite (2001), Angulo et al. (2005) e Carrijo (2005), Campos e Leite (2010), Werle (2010) e Troian (2010) etc. e outros autores como Miranda (2000), Corinaldesi et al. (2002), Miranda e Selmo (2001), Pedrozo (2008), Menezes et al. (2009) e Silva et al. (2007), Poon e Kou (2010) e Neno (2010) entre outros, analisaram o

comportamento em argamassa apontando a viabilidade técnica de sua aplicação em materiais destinados à construção civil.

A necessidade de pesquisas nesta área indicando a incorporação de resíduos de construção e demolição, como uma alternativa de matéria prima sustentável, existe com propósito de contribuir para o desenvolvimento investigatório no âmbito da reutilização dos RCDs.

Neste contexto, esta pesquisa busca avaliar a substituição dos agregados naturais (areia natural de leito de rio) por agregados miúdos de concreto na incorporação de argamassa de revestimentos, de modo a verificar a sua viabilidade, aumentando assim o seu potencial de utilização de forma a suprir a demanda por argamassas de revestimento.

As questões que nortearam a proposição e desenvolvimento da pesquisa referem-se, principalmente, à influência das características dos agregados reciclados no desempenho de argamassas de revestimento. Os ARC, por serem compostos por agregados e argamassa, possuem expressivas diferenças nas características morfológicas, na distribuição granulométrica, na massa unitária e na absorção de água do ARC com relação às areias naturais de leito de rio; além disto, podem apresentar cimento anidro em sua composição, que por sua vez pode sofrer hidratação. Estas diferenças podem alterar substancialmente as propriedades das argamassas.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho são apresentados na sequência.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é contribuir para o estudo da influência do AMRC nas propriedades das argamassas de revestimentos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- analisar a influência da forma do grão do agregado miúdo reciclado de concreto nas propriedades da argamassa de revestimento no seu estado fresco e endurecido;
- avaliar a influência dos materiais que constituem as partículas do ARC nas propriedades da argamassa de revestimento;

- avaliar a influência das propriedades do concreto que originou o agregado miúdo reciclado de concreto nas propriedades do estado fresco e endurecido das argamassas;

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O capítulo 1, Introdução, apresenta uma breve introdução, justificativa e importância da pesquisa, bem como seus objetivos e hipóteses.

O capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta uma contextualização sobre os resíduos de concreto (RC).

O capítulo 3, Programa Experimental, descreve os materiais e métodos adotados da pesquisa. Neste capítulo são detalhados os métodos adotados para a realização dos ensaios nas argamassas, assim como a apresentação dos materiais utilizados.

No capítulo 4, Apresentação, Análise e Discussão dos Resultados são apresentados os resultados obtidos na análise da forma dos grãos dos agregados, empregados na produção das argamassas e os resultados obtidos no programa experimental, como os ensaios no estado fresco e endurecido. Os resultados são amostrados em forma de gráfico e tabelas, sempre que possível, a partir das médias dos valores obtidos.

No capítulo 5, Conclusão, são apresentadas as considerações finais sobre as argamassas com ARC no estado fresco e endurecido e as sugestões para futuras pesquisas em argamassas para revestimento.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho foi delimitado em função das especificidades da pesquisa, como o prazo e os custos de ensaios. Apenas dois tipos de agregados reciclados e apenas um traço de argamassa (mista, composta por cimento e cal) foram utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo de revisão bibliográfica são abordados temas pertinentes ao estudo, como a contextualização dos resíduos de concreto (RC), tendo em vista que no programa experimental foram produzidas argamassas com agregados reciclados originários de resíduos de concreto de uma indústria de pré-fabricados. Nesse sentido, é oportuno contemplar no presente capítulo um panorama dos resíduos de concreto, como a sua geração, as estimativas de geração, emprego e normatização para a reciclagem desse resíduo, com ênfase no emprego do resíduo de concreto em argamassas.

2.1 PANORAMA DOS RESÍDUOS DE CONCRETO

Como este trabalho tem como foco a reciclagem de resíduos de concreto pré-fabricado, torna-se interessante abordar os resíduos de concreto (RC) de diversas fontes de geração, tais como os resíduos provenientes de construção e demolição (RCD), catástrofes naturais ou artificiais, oriundos de usinas de concreto pré-misturado e fábricas de elementos pré-moldados.

2.1.1 Geração dos resíduos de concreto

Os resíduos provenientes de concreto são originados em diversas fontes geradoras: dentro dos canteiros de obra; reformas e demolições; por meio de catástrofes; demolições de pavimentos rodoviários de concreto ou de obras que chegaram ao final de sua vida útil; por deficiências inerentes ao processo construtivo; e à baixa qualificação da mão de obra.

Buttler (2007), sustenta que o concreto residual em fábricas de pré-moldados e blocos é proveniente de elementos rejeitados pelo controle de qualidade, peças de final de linhas de produção e sobras de concreto fresco ao final do processo. Acrescenta, ainda, que outra fonte geradora de RC são as empresas de serviços de concretagens, onde grande parte dos resíduos é gerada pelo retorno de sobras de concreto nos caminhões betoneira, limpeza de bombas de lançamento de concreto ou, ainda, pela lavagem dos caminhões e instalações da central dosadora. Guerreiro (2008) complementa essas afirmações dizendo que o desperdício de concreto dosado em Central ocorre principalmente na tubulação e no agitador das bombas de concreto, bem como na limpeza nas instalações da Central. Além dos citados, ainda pode-se relacionar os resíduos provenientes dos corpos de prova de concreto ensaiados na rotina de controle tecnológico.

2.1.2 Estimativas de geração de RCD e de geração de RC

Conforme a World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), no documento *The cement sustainability initiative - Recycling concrete*, uma parcela significativa do RCD é composta de resíduo de concreto presente, podendo variar entre 20% a 80% devido às diferenças regionais e culturais (WBCSD, 2009).

As estimativas da geração de RC a partir dos RCD apontadas por diversos autores são preocupantes e por si só já constituem motivos suficientes para que sejam tomadas medidas urgentes para conter o avanço do problema. Na Tabela 1, são apresentados índices de geração de resíduos e porcentagem reciclada de diferentes países.

Tabela 1 - Geração e porcentagem reciclada dos RCD e RC.

País	Produção RCD Milhões (ton/ano)	Produção de RC Milhões (ton/ano)	Quantidade utilizada (%)
Brasil	68 ⁽³⁾	4,8 – 14,3 ⁽¹⁰⁾	3,6 – 4,5 ⁽⁸⁾
Alemanha	213,9 ⁽⁶⁾ ; 201 ⁽¹¹⁾	51,3 ⁽¹²⁾	87,1 ⁽⁶⁾ ; 89 ⁽¹¹⁾
Austrália	14 ⁽¹¹⁾	1,5 ⁽⁹⁾	57
Bélgica	14 ⁽⁶⁾⁽¹¹⁾	-	85,7 ⁽⁶⁾ ; 86 ⁽¹¹⁾
Canadá	11 ⁽⁹⁾	2,3 ⁽⁹⁾	-
Espanha	38,5 ⁽¹⁾ ; 39 ⁽¹¹⁾	-	10 ⁽¹⁾⁽¹¹⁾
EUA	250 - 300 ⁽²⁾ ; 317 ⁽¹¹⁾	155 ⁽¹¹⁾	20 - 30 ⁽²⁾ ; 82 ⁽¹¹⁾
França	309 ⁽⁶⁾⁽¹¹⁾	-	63,1 ⁽⁶⁾ ; 63 ⁽¹¹⁾
Holanda	25,8 ⁽⁶⁾ ; 26 ⁽¹¹⁾	13 ⁽⁹⁾	95,3 ⁽⁶⁾ ; 95 ⁽¹¹⁾
Hong Kong	20 ⁽⁴⁾	3,5 ⁽⁹⁾	-
Japão	77 ⁽¹¹⁾	-	80
Reino Unido	91 ⁽⁶⁾ ; 90 ⁽¹¹⁾	-	89,9 ⁽⁶⁾ ; 50-90 ⁽¹¹⁾
Republica Checa	9	3 ⁽¹¹⁾	45
União Européia	500 ⁽⁷⁾ ; 510 ⁽¹¹⁾	13 ⁽⁹⁾	25 ⁽³⁾

Fontes: (1) ALAEJOS et al. (2004); (2) LAURITZEN (2004); (3) ÂNGULO (2005); (4) POON E CHAN (2006); (6) GONÇALVES (2007); (7) FERREIRA (2007); (8) MIRANDA et al. (2009); (9) CARVALHO (2011); (10) JADOVSKI (2005); (11) WBCSD (2009); (12) SCHULTMANN e RENTZ, (2000).

De acordo com os dados abordados na Tabela 1, a Suíça apresenta índices de geração de RCD relativamente baixo, quando comparado a outros países; porém, é líder absoluto na reciclagem de RCD ao apresentar um percentual elevado de reciclagem, próximo a 100%. A Holanda possui 95,3% de taxa de reciclagem, onde está relacionada com avanços em alguns aspectos do modelo de sustentabilidade. Segundo Buttler (2007), a Holanda é um país exemplar na questão de reaproveitamento de RCD, pois tem uma política que minimiza o uso de materiais naturais e promove a utilização de materiais reciclados dentro de um sistema de mercado (FHWA, 2000). Impulsionado pela cobrança da sociedade contra a utilização de áreas para a deposição de resíduos e a exploração de recursos naturais, o governo holandês adotou medidas para coibir o desperdício e promover a reciclagem, elevando em cerca de cinco vezes as taxas punitivas para deposição de RCD no meio ambiente.

Com relação à geração de RC, os EUA apresentam valores significativos, com cerca de 16% dos resíduos mundiais, segundo o WBCSD (2009). Dados abordados na The European Cement Association (CEMBUREAU, 2006), mostram que a China e a Índia geram uma quantidade de resíduos de concreto ainda mais elevada que os EUA, e ambos produzem mais de 50% do concreto do mundo. Esses elevados índices podem ser explicados pelo fato da China e da Índia serem países emergentes, em franco desenvolvimento, que possuem crescente demanda no setor da construção civil.

Na Bélgica, resíduos de concreto e alvenaria são responsáveis por cerca de 80% do total gerado. Com relação à participação das diferentes origens, é possível dizer que tais índices são extremamente variáveis, uma vez que têm relação direta com a relação entre as atividades de construção e demolição da região (BERNARDES et al., 2008). Ao analisar os tipos de materiais que predominam nos RCD na Europa, Mueller (2006) concluiu que os resíduos de concreto variam de 2 a 39% do total gerado.

No Brasil, segundo Jadovski (2005), a estimativa gerada de resíduos de concreto, varia entre 7% a 21% dos RCD. Para Lucena et al. (2005), este percentual fica em torno de 9% de resíduos de concreto.

Para WBCSD (2009), muitos dos países desenvolvidos, como a Holanda, Japão, Bélgica e Alemanha, possuem sistemas de reciclagem de RC proveniente dos resíduos de construção e demolição com elevados níveis de recuperação. Em contraponto, em muitos outros países os resíduos de concreto são geralmente depositados em aterros.

Essas variações de percentuais da composição dos RCD são bastante diversificadas em virtude das técnicas construtivas adotadas e dos insumos disponíveis para construção civil em cada região. A Tabela 2 apresenta a composição dos RCD e o percentual de concreto derivado do mesmo em algumas cidades brasileiras.

Tabela 2 - Comparativo da composição dos resíduos de construção e demolição em algumas cidades brasileiras.

Componente	%			
	Argamassa	Concreto	Cerâmica	outros
Porto Alegre ⁽¹⁾	44,2	18,3	35,7	1,8
Salvador ⁽²⁾	33	20	14	33
Maceió ⁽³⁾	27,82	18,65	48,15	5,38
Baurú ⁽⁴⁾	25	32	31	12
São Leopoldo ⁽⁵⁾	22	26	31,60	20,4
Novo Hamburgo ⁽⁵⁾	34	26,8	22,7	16,5

Fontes: (1) Lovato (2007); (2) Carneiro et al. (2001); (3) Vieira (2003); (4) Batistelle et al. (2006); (5) Kazmierczak et al., (2006)

Apesar de o Brasil possuir índices de geração de RCD e RC consideráveis, estimados em 68 e 4,8 a 14,3 milhões ton/ano, respectivamente (conforme apresentado na Tabela 1), o país encontra-se aquém de processos de reciclagem quando comparado aos países desenvolvidos. As baixas taxas de reciclagem, comparativamente a outros países provavelmente possam ser justificadas pela ineficácia do poder público, pela falta de conscientização da população, pelo reduzido investimento público/privado em novas instalações de reciclagem e atribuída, ainda, à relativa abundância de recursos naturais e à falta de conhecimento sobre o comportamento do material reciclado (BUTTLER, 2007).

Até 2002, não existiam leis e resoluções para os resíduos gerados pelo setor da construção civil no país. Para superar os problemas ambientais advindos dos resíduos da construção, naquele ano foi criada a Resolução nº. 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que institui diretrizes, critérios e procedimentos para a Gestão dos Resíduos da Construção Civil e que organiza a cadeia de responsabilidades: gerador - transportador – poder público municipal, obrigando os geradores a reduzir, reutilizar e reciclar, tratar e dispor os resíduos de construção e demolição. Esta Resolução determina, ainda, as diretrizes para que os municípios e o Distrito Federal tenham instrumentos para desenvolver e programar políticas de gestão local sob a forma de Planos Integrados de Gerenciamento, com a finalidade de identificar responsabilidades dos grandes geradores e assumir soluções para pequenos geradores, de forma a disciplinar as ações dos agentes envolvidos desde a geração de RCD até a sua disposição final (KARPINSKI et al., 2008).

O Brasil ainda está se organizando para regulamentar a destinação dos resíduos de construção e já criou alguns instrumentos legais, tais como: O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, uma das etapas da implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS),

as Resoluções do CONAMA e as Normas Técnicas ABNT NBR 15112 a 15114, publicadas em 2004.

Segundo Purificação (2009), geralmente o resíduo de concreto ao retornar para a central é aplicado na pavimentação de área de manobras e utilizado em produtos sem fins estruturais, como blocos de separação e divisa.

Ao analisar a quantidade de RC desperdiçada nas usinas de concreto pré-misturado e fábricas de pré-moldados, Obla et al., (2007) expõe que nos EUA, a cada ano estima-se uma média de 5% dos 455 milhões de m³ de concreto pré-misturado produzido. Já na Europa, o volume de concreto pré-misturado desperdiçado é inferior, cerca de 1% a 4% segundo Purificação (2009).

Segundo Vieira (2011), o volume de concreto desperdiçado em obra é relevante e sistêmico, já que parte deste concreto é devolvida à central dosadora de concreto. As principais causas de devolução são provenientes de pedidos de material superiores ao necessário na obra (74%), obra não preparada (4,8%), problemas em obra (3,3%), entre outros.

Buttler (2007), estima que no Brasil em fábricas de pré-moldados de pequeno porte são gerados cerca de 0,2 metros cúbicos por dia de RC (2% da produção total). Já em uma fábrica de grande porte do interior paulista, o volume de resíduos pode resultar em 7 m³ diários, ou 1% da produção total. Desse total, em torno de 30 metros cúbicos e 12 metros cúbicos, seriam provenientes de blocos de concreto rejeitados pelo controle de qualidade e rejeitos de vigotas e painéis de laje pré-moldados, respectivamente (BUTTLE 2007).

No Rio Grande do Sul, em trabalho realizado por Cavalheiro (2011), em uma fábrica de grande porte de concreto pré-fabricado, observou-se que a média de geração de resíduos do período amostrado foi de 0,9% da produção de concreto, no entanto estima-se que se forem acrescentados resíduos não computados (originados nas etapas de transporte e montagem de estruturas), estima-se que média poderá chegar a 1,5%.

Algumas estimativas fornecidas pela ABESC - Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem para a região metropolitana de São Paulo apontam para um volume de cerca de 3500m³ a 7000m³ de concreto residual gerados mensalmente nas centrais dosadoras (ABESC, 2007).

Com base neste panorama, os índices de resíduos de concreto que compõem os RCD no Brasil, variam entre 7% a 32%. Segundo Ângulo et al. (2003) diante da quantificação

e composição dos RCD gerados nacional e internacionalmente, pode-se verificar a importância da reciclagem destes resíduos e a necessidade de aproximar o setor da construção civil da sustentabilidade através da redução dos impactos negativos dos seus resíduos nas cidades e da geração de matéria-prima que pode ser substituída pela natural, não renovável (ANGULO et al., 2003).

2.1.3 Normatização para reciclagem dos RC

As primeiras normas para a utilização de agregado reciclado de concreto foram propostas pelo Japão, em 1977. A partir dos anos 80, normas e recomendações também entraram em vigor nos Países Baixos, na Dinamarca, na Rússia e na Alemanha, entre outros (LEITE, 2001).

As normas e especificações de RC existentes são menos restritivas quando se trata do emprego de agregados reciclados de concreto, comparativamente aos agregados reciclados de RCD, permitindo o emprego desses agregados para concretos de até 60 MPa (BS 8500: Part 2, 2002; RILEM RECOMMENDATION, 2004); já outras normas, tais como o código espanhol citado por Alaejos et al. (2004) e o texto normativo brasileiro citado por Oliveira et al. (2004), permitem o emprego de agregados reciclados oriundos de resíduos de concreto para a produção de concreto estrutural.

Não existe consenso sobre a situação atual da reciclagem de resíduos, apesar de Buttler et al. (2005) afirmar que a publicação da Resolução N. 307 do CONAMA (CONAMA, 2002) e a entrada em vigor de normas técnicas tratando do gerenciamento e utilização de RCD, colocam o Brasil, em posição de vanguarda quando comparado a outros países da América Latina. Grubba (2009), acredita que mesmo com a publicação de legislações e normas técnicas específicas sobre o assunto, o Brasil ainda se mostra aquém do ideal em relação à reciclagem de resíduos de construção e demolição.

Com o avanço da reciclagem de RCD no Brasil outras normas específicas relativas à sua gestão e seu emprego foram publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004):

- ABNT NBR 15112: 2004 - Resíduos da construção civil e resíduos volumosos
- Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- ABNT NBR 15113: 2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação;

- ABNT NBR 15115: 2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos;
- ABNT NBR 15116: 2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.

2.1.4 Emprego de resíduo de concreto

Segundo Angulo et al. (2003), a aplicação de agregados de RCD para o setor de pavimentação é a única alternativa tecnologicamente consolidada, porém o seu uso não garante uma reciclagem massiva deste resíduo, sendo indispensável que sejam desenvolvidos outros mercados para garantir a reciclagem em grande escala de RCD, como, por exemplo, matéria-prima cerâmica.

Com o progresso tecnológico e, sobretudo, pela ausência de matéria prima após a Segunda Guerra Mundial, alguns países europeus passaram a desenvolver métodos de reciclagem de materiais frente às restrições ambientais que, para manter as reservas naturais, acabaram encarecendo ou inibindo a extração desses minerais.

Todavia, a primeira aplicação significativa de RCD somente foi registrada posterior ao final da 2ª Guerra Mundial com a reconstrução das cidades Européias, as quais tiveram suas edificações completamente demolidas. Os resíduos foram britados para a produção de agregados buscando atender à demanda no período. Assim sendo, é possível dizer que, a partir de 1946, teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem de resíduo de construção civil (SOUZA, 2006).

Especificamente sobre a aplicação de resíduos de concreto (RC), os Estados Unidos encontram-se frente a outros países quanto a uso de resíduos de concreto (agregados reciclados) em bases e sub-bases de rodovias. Na Austrália, segundo Buttler (2007), Crowther (2000) menciona que cerca de 70% a 80% dos resíduos de concreto são utilizados em bases de rodovias. Já no Brasil, Buttler (2007) menciona as diversas usinas de reciclagem situadas na cidade de Belo Horizonte que aplicam a fração dos agregados oriundos de resíduos de concreto na produção de blocos não-estruturais de concreto. O uso de RC em construção estrutural é menos freqüente, sendo possível citar a utilização em estruturas na execução de um viaduto e de um bloqueio marítimo projetados na Holanda, em 1988 e sua aplicação em um edifício de escritórios no Reino Unido, em 1999, segundo divulgações de Poon et al. (2002).

Não há muitos registros sobre a aplicação de resíduos de concreto em argamassas de revestimento. Em Portugal, Neno (2010) investigou o comportamento de argamassas com incorporação de resíduos de concreto, em substituição da areia natural (mantendo a curva granulométrica da areia natural). Foram produzidas três argamassas com taxas de incorporação de 20, 50 e 100% de areia natural pelos agregados miúdos de concreto. No mesmo país, Braga (2010) estudou o desempenho de argamassas de revestimento com agregado reciclado de concreto, porém através do efeito microfinos e com taxas de incorporação de 5, 10 e 50%.

No Brasil, a reciclagem e aplicação dos agregados reciclados estão em fase embrionária: quando reaproveitado, grande parte desse material é utilizada especialmente em pavimentações, em função de ainda existirem dúvidas e questionamentos a respeito do uso de resíduos em concreto estrutural (TROIAN, 2010). Muito dos agregados produzidos pela reciclagem de RCD no país, além de serem utilizados como bases de pavimentação, também são empregadas em blocos de concreto para pavimentação e vedação (ÂNGULO e JOHN, 2006; SOUZA, 2006 e ALIPIO, 2010).

Os resíduos de concreto (RC) no país representam uma parcela significativa dos resíduos de construção e demolição. Sua reciclagem na forma de agregado é uma alternativa atraente para aumentar a oferta de materiais de construção e podem ser empregados na produção de argamassas como substituto aos agregados naturais, obtendo assim, redução na exploração de recursos naturais não renováveis (GRUBBA, 2009).

2.2 AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

2.2.1 Beneficiamento dos resíduos de concreto para a obtenção de agregados

Existem diversos processos que podem ser utilizados na reciclagem para os resíduos de concreto. Basicamente os dois tipos de resíduos gerados nas usinas de concreto pré-misturado e fábricas de elementos pré-moldados são os rejeitos de concreto no estado fresco e rejeitos de concreto no estado endurecido (BUTTLER, 2003).

Segundo Rezende et al. (1996) apud Butler (2003), um dos métodos aplicados para a reciclagem do concreto fresco consiste na separação dos agregados da água de lavagem (partículas de cimento mais finos em suspensão). No sistema mecânico de separação, o processo de reciclagem é extremamente simples. Os resíduos de concreto fresco são depositados num funil alimentador, que conduz essas sobras para a primeira seção do equipamento, onde permanentemente é colocada água para auxiliar na decantação dos

agregados, de modo que o aglomerante existente permaneça em suspensão. Buttler (2003) justifica o uso do equipamento para reciclagem do concreto fresco devido aos benefícios técnico-econômicos do reaproveitamento dos agregados no processo de lavagem, ausência dos custos com a deposição de resíduos sólidos e ainda aos beneficiamentos ambientais provenientes da reciclagem. Segundo o autor, para o tratamento do concreto fresco são utilizadas caixas de sedimentação do material. Por se tratar de um procedimento de pequeno investimento, este método vem a ser o sistema mais aplicado, o qual consiste de uma caixa de sedimentação de fundo inclinado, no qual são lançados o concreto residual e os resíduos da lavagem dos caminhões e do pátio central. Para o reaproveitamento da água utilizada na lavagem é necessária a execução de duas a quatro caixas, em série, para a decantação do aglomerante e partículas finas em suspensão na água.

Para a cominuição dos resíduos de concreto endurecidos faz-se necessário o uso de equipamentos tais como os britadores de mandíbula, de impacto, giratório e de cone, britador de rolo e moinho de martelo. O britador de mandíbulas fratura o material por esmagamento, compressão. A quebra do material ocorre pela força de compressão do equipamento, aplicada através do movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície de britagem móvel contra outra fixa (PAUL et al.,2003). O britador de impacto fragmenta o concreto através da colisão do material em placas fixas de impacto (CAVALHEIRO, 2011). Segundo pesquisas desenvolvidas por Buttler (2003), Hansen (1995) diz que este equipamento é mais indicado para a obtenção de agregados com destinação para sub-bases e bases de rodovias e são menos suscetíveis a materiais que não podem ser britados como barras de aço presente nas estruturas de concreto armado. Com relação ao britador giratório e de cone, a redução do tamanho do concreto ocorre pela combinação da compressão e do atrito. Os agregados obtidos com esses equipamentos são superior aos de mandíbula, resultando uma melhor proporcionalidade de dimensões das partículas, melhor graduação e aumento do percentual de microfinos (PAUL et al.,2003). Segundo o autor, existe ainda o britador de rolo que opera por compressão aplicando o princípio de fragmentação por clivagem. Este equipamento produz agregados de tamanhos pequenos. O britador de martelo é utilizado em um processo secundário de cominuição, pois a abertura do equipamento para a introdução do material não comporta grandes dimensões de concreto, sendo assim, este britador geralmente está associado ao britador de mandíbulas. De acordo com Lima (1999), o uso de um moinho de martelos na cominuição dos resíduos produzir uma alta porcentagem de miúdos, em virtude da abertura da entrada de materiais ser relativamente pequena. Segundo

Paul et al. (2003) a fragmentação do material é realizada pelo impacto dos martelos girando em alta velocidade e pela colisão do material arremessado.

Segundo Ballista (2003) e Buttler (2003), a adequada seleção do tipo de britador a ser utilizado otimiza os resultados e proporciona agregados com a granulometria e forma de partículas desejadas.

2.2.2 Características dos agregados reciclados provenientes de concreto

Um dos principais condicionantes do processo de reciclagem é a necessidade de produzir produtos homogêneos e de características adequadas, a partir de resíduos heterogêneos e de origem bastante diversificada. De acordo com Grubba (2009), os agregados reciclados de concreto (ARC), estimados os mais nobres e homogêneos quando comparado aos demais tipos de resíduos. Esses agregados podem ser empregados em diversas aplicações, como na confecção de argamassas, elementos pré-moldados de concreto, calçadas etc.

Com relação aos resíduos de concreto oriundos de indústria de pré-moldados ou de usinas de concreto pré-misturado, a homogeneidade do material beneficiado fica garantida, uma vez que suas propriedades físicas e mecânicas podem ser conhecidas e o grau de contaminação por outros tipos de rejeitos é bem menor. Sendo assim, os RC com esta origem apresentam um dos maiores potenciais de utilização como agregado reciclado (BUTTLE, 2007).

Os resíduos de concreto gerados em fábricas de pré-moldados apresentam um excelente potencial para serem reciclados, devido principalmente ao conhecimento de suas características fundamentais (resistência à compressão, idade, etc..) e presença insignificante de contaminação por outros materiais (vidro, borracha, etc..) quando comparado aos resíduos de construção e demolição. (BUTTLE, 2003; BUTTLE e CORREA, 2006).

De acordo com Buttler (2003), os agregados reciclados derivados de concretos de média e alta resistência, podem apresentar propriedades aglomerantes sendo superiores aos obtidos por agregados provenientes de resíduos de concreto de resistência inferior. Segundo Buttler (2003), em fábricas de pré-moldados e usinas de concreto pré-misturado, é possível o uso de britadores de pequena capacidade que permitam a reciclagem imediatamente após a geração de resíduos originando agregados com grande quantidade de cimento não-hidratado.

A necessidade de obtenção de argamassas de revestimento produzidas com agregados miúdos reciclados com semelhante desempenho às produzidas com agregados naturais tem conduzido a pesquisas mais aprofundadas das propriedades desses materiais

(KHEDER e WINDAWI, 2004; MIRANDA e SELMO, 2006; ETXEBERRIA et al., 2007; NENO, 2010).

Segundo Metha e Monteiro (2008), para conceder um potencial de uso de um material reciclado na construção, é indispensável que o material produzido satisfaça a certas exigências de composições granulométricas, forma, textura, resistência, dureza, assim como o módulo de elasticidade, absorção de água, ausência de contaminantes, além de outras exigências de estabilidade e durabilidade exigidas. Alguns autores atribuem como uma alternativa de agregado miúdo que substitua à areia natural, pensa-se em "replicar" essa areia, ou seja, utilizar um agregado reciclado que tenha as mesmas características granulométricas e isenta de finos (microfinos). Esse processo de adequação dos agregados reciclados é um aspecto positivo na construção, pois permite valorar os resíduos das construções de modo a potencializar o seu reuso em novos materiais (BASTOS et al., 2006; NENO, 2010).

Pouco se conhece sobre as conseqüências da substituição da AN para a areia de concreto sob aspectos de desempenho. Salienta-se, desta forma, a importância da realização de estudos que venham a contribuir, tanto na busca de soluções ambientais, quanto no conhecimento das propriedades das argamassas produzidas com ARC.

2.2.3 Propriedades físicas dos agregados reciclados de concreto

Ao estudar a substituição dos agregados naturais por ARC para produção de argamassas de revestimento, é importante considerar todos os parâmetros texturais dos grãos isolados dos agregados, tais como a distribuição granulométrica, a forma (arredondamento e esfericidade), a composição do grão e a textura superficial.

As areias para aplicação em argamassa possuem grande variação no tamanho, na forma, na textura superficial, em função da sua composição mineralógica e forma de produção. Diante disso, é importante quantificar os parâmetros texturais para avaliar a classificação das areias para argamassas de revestimento (TRISTÃO, 2005).

O autor enfatiza a importância de classificar os agregados:

Geralmente, as areias naturais tendem a ser arredondadas, ao passo que as areias industrializadas tendem a ser angulosas, mas que, algumas areias industrializadas ou britadas podem ser um pouco arredondadas ao invés de completamente angulares (TRISTÃO, 2005, p. 29-30).

Percebe-se, desta revisão bibliográfica, que as variações dos parâmetros texturais das areias naturais são decorrentes das suas diversas origens, enquanto que as areias artificiais dependem também dos equipamentos

utilizados na sua produção, e que é fundamental caracterizar as areias quanto aos seus parâmetros texturais (TRISTÃO, 2005, p. 30).

Souza (2006) menciona que é importante levar em consideração as características dos agregados como as dimensões máximas, distribuição granulométrica, forma e textura superficial das partículas. O autor diz que a dimensão de um agregado vai influenciar diretamente na quantidade de água e cimento utilizado no concreto. Agregados com grandes superfícies específicas tendem a absorver maior quantidade de água. No entanto, não é possível estabelecer um tamanho ideal de agregado, pois seu tamanho máximo irá depender diretamente da aplicação (SOUZA, 2006). Diante desses aspectos abordados, faz-se necessário conhecer as características dos agregados reciclados.

a) Distribuição granulométrica

Para determinar a distribuição granulométrica, utiliza-se a norma ABNT NBR 5734:1988, que especifica as peneiras de malha quadrada a serem utilizadas e a norma ABNT NBR 248:2003, que aponta os procedimentos utilizados. O processo de peneiramento resulta na porcentagem em massa dos grãos retidos ou acumulados em cada peneira. Araújo (2001), destaca que é comum fazer referência ao tamanho dos grãos através de diâmetros, porém a forma de representar é relativa, pois os grãos não são esféricos. Este apontamento foi explicado pelo autor, com base nas pesquisas de Kwan et al. (1999), ao alertarem que esta representação da granulometria, não permite obter nenhuma informação sobre a forma da partícula. De acordo com Kwan et al. (1999) as partículas de baixa esfericidade, alongadas e com comprimento superior a abertura da peneira podem passar pela peneira de malha quadrada sem dificuldade, uma vez que a abertura da peneira é o comprimento lateral da partícula. Segundo o autor, as partículas lamelares podem passar através da peneira, diagonalmente. Nesta situação, a largura da partícula pode ser maior que a abertura, no entanto, deve ser menor que a diagonal da abertura da malha.

O tipo e a granulometria do resíduo, e a forma de britagem, influenciam na distribuição granulométrica final dos agregados reciclados produzidos (LIMA, 1999; BUTTLER, 2003). Freitas (2010), acrescenta que o processo de fragmentação do material tende a produzir partículas mais angulares.

A distribuição granulométrica dos agregados é uma propriedade muito importante uma vez que podem influenciar na trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, absorção de água, permeabilidade, entre outros (TOPÇU, 2004).

Fernlund (1998) mencionado por Tristão (2005), comenta que a classificação do tamanho de agregado, é um método grosseiro e que não dá a exata medida das dimensões dos grãos. Tristão (2005), menciona que quando se trabalha com grãos não esféricos de diversos tamanhos, como no caso de concretos e argamassas, não é suficiente a caracterização dos agregados somente com a distribuição granulométrica. Na Figura 1, o autor apresenta um exemplo dos grãos de várias formas que ficam retidos entre as peneiras (38 – 32) mm.

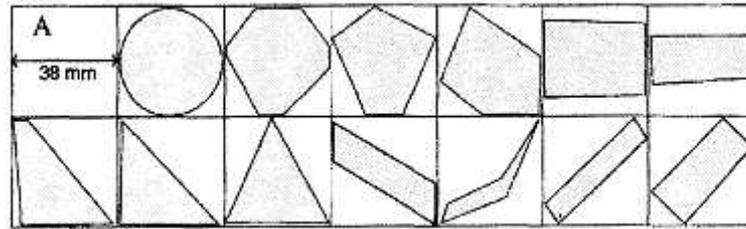


Figura 1 - Projeções de grãos com formas variadas na fração 38 – 32 mm.

Fonte: Fernlund (1998 apud TRISTÃO, 2005).

Autores como Miranda e Selmo (2006), concluíram que os agregados apresentam uma distribuição granulométrica mais contínua, em relação a outros agregados reciclados, sendo considerado adequado para utilização em argamassas. Mais recentemente, observou-se que a distribuição granulométrica contínua não é ideal sendo necessária pequenas descontinuidades na argamassa.

Buttler (2003), citou que a distribuição granulométrica dos ARC está relacionada com a idade de cura do concreto, concluindo assim, à medida que aumenta a idade de cura do resíduo de concreto antes da reciclagem, a fração graúda torna-se mais representativa.

O autor explica ainda que a maior quantidade de miúdos para o AMRC com 1 dia de idade deve-se ao fato de que durante o processo de peneiramento ocorreu um maior desprendimento e quebra de partículas de argamassa que antes estavam aderidas ao agregado natural. Segundo o autor, outra explicação para a elevada quantidade de miúdos é a existência de grande quantidade de partículas de cimento não hidratadas, uma vez que estas não apresentavam ligação efetiva com a superfície do agregado.

O estudo da compactidade de materiais granulares é uma preocupação dos pesquisadores. Segundo Tristão (2005), o empacotamento de partículas, está associado a cada fração granulométrica e à forma do grão. Como a quantidade de grãos em cada fração depende da forma do grão, analisando a mesma massa específica, o conhecimento da distribuição granulométrica em termos de números de grãos é uma informação importante no

que se refere ao desenvolvimento de areias com o menor volume de vazios, pois irão produzir argamassas com menor consumo de aglomerante.

A presença de microfinos na argamassa melhora tanto a resistência à compressão quanto à tração na flexão. O microfino ocupa os espaços vazios entre as partículas maiores, tendo assim, um empacotamento melhor que a argamassa com teor de finos menores e a partir disso, tendo um aumento das resistências mecânicas (SILVA, 2006 b). A densidade de massa aparente no estado endurecido da argamassa é uma propriedade importante que pode explicar o desempenho do revestimento quanto às propriedades mecânicas, influenciada, principalmente, pelo empacotamento das partículas dos agregados miúdos e, também, pelo empacotamento do conjunto agregados-aglomerantes (SILVA, 2006 b).

Não somente as frações granulométricas estão associadas ao empacotamento das partículas, mas a forma dos grãos também. Como a quantidade de grãos em cada fração depende da forma do grão, considerando a mesma massa específica, o conhecimento da distribuição granulométrica em termo de números de grãos é um dado importante no desenvolvimento de areias com os menores volumes de vazios, que irão determinar argamassas com menores consumos dos aglomerantes (TRISTÃO, 2005).

Tristão (2005) analisou em sua pesquisa que o volume de vazios das areias está correlacionado com os coeficientes de uniformidade, onde as areias desuniformes que apresentam os maiores coeficientes de uniformidade são as que apresentam os menores volumes de vazios. Observou ainda que a distribuição granulométrica das areias influencia no volume de vazios e, conseqüentemente, na proporção de mistura das argamassas, mas que a forma dos grãos que compõem a areia exercem maior influência.

Percebe-se que a distribuição granulométrica das areias pelo método de peneiramento não é suficiente para caracterizar as propriedades dos grãos e, que a forma do agregado é um influencia nas propriedades, sendo assim torna-se importante analisar a forma dos mesmos buscando sustentar a interpretação da distribuição granulométrica das areias.

b) Forma e composição do grão

De acordo com Arnold (2011), a forma do grão é o aspecto exterior que a partícula do agregado apresenta quanto à relação de dimensões (grão alongado, grão esférico, grão cúbico, grão lamelar, grão discóide ou grão quadrático), quanto às arestas e cantos (grão anguloso ou grão arredondado) e quanto à textura superficial das faces (grão liso ou grão áspero).

Bouquety et al. (2007), mencionam que a forma do agregado miúdo é um dos parâmetro essencial na caracterização da qualidade do agregado, uma vez que influenciam nas propriedades de uma argamassa e, que a origem e o processo de obtenção dos agregados também influenciam na forma das partículas e no tamanho das mesmas. Cortes et al. (2008), mencionam que agregados miúdos naturais tendem a ser arredondados, devido ao efeito cumulativo de colisões múltiplas e de abrasão. Já os agregados miúdos industriais são produtos de trituração que determinam grãos com formas distintas de partículas, que dependem da composição da rocha-mãe, modo de fratura, coordenação durante a trituração, e a relação de redução. O processo de trituração tende a produzir partículas angulares. Partículas angulares de maior dureza produzem um empacotamento dos grãos de menor densidade, baixa tensão e maior ângulo de atrito no estado crítico, quando comparado com os agregados miúdos naturais.

Buttler (2003) ilustrou a microestrutura do concreto com agregado graúdo reciclado, verificando-se que as propriedades do material são influenciadas principalmente pelas características da argamassa aderida ao agregado reciclado e pela nova matriz de cimento em contato com o reciclado, conforme Figura 2.

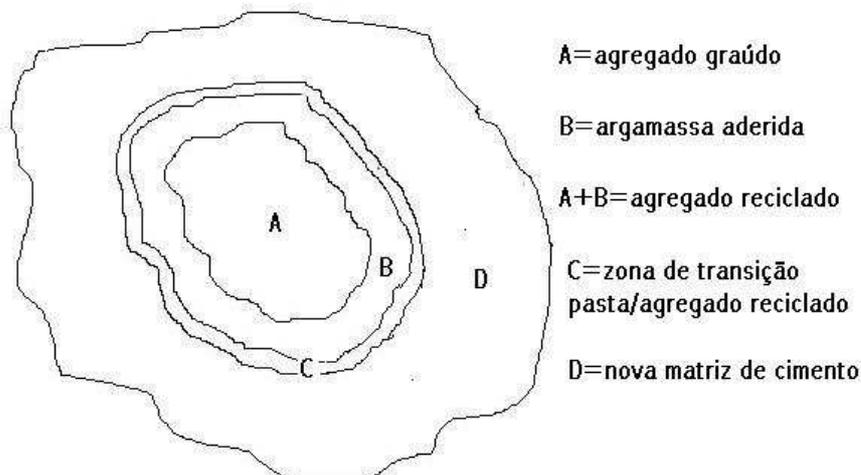


Figura 2 - Microestrutura do concreto reciclado.

Fonte: Buttler (2003)

A fase agregado é a principal responsável pelo módulo de elasticidade, pela massa unitária e pela estabilidade dimensional do concreto. A massa específica do agregado graúdo influi diretamente na massa específica do concreto, sendo ainda diretamente proporcional à resistência do concreto, ou seja, quando maior a porosidade, índice de vazios, dos grãos, menor será a sua resistência tornando-se o elo fraco da mistura (BUTTLER, 2003).

Para o autor, a qualidade do resíduo de concreto (agregado graúdo reciclado) é essencial na determinação das propriedades mecânicas do novo concreto. A argamassa aderida ao reciclado pode representar o elo mais fraco da mistura, quando sua resistência for menor que a resistência da nova zona de transição; especialmente devido à sua maior porosidade.

Segundo Buttler (2003), os ARC que foram reaproveitados logo após sua geração, ou seja, que possuem cimento não-hidratado presente na sua superfície, a resistência do conjunto será determinada pelas características da argamassa aderida ao agregado. Neste caso, haverá mais partículas de cimento para se hidratarem na nova zona de transição e capazes de se dispor densamente junto das partículas grandes do agregado; conseqüentemente haverá um menor índice de vazios na zona de transição que influenciará de maneira menos significativa na resistência. O pesquisador acrescenta que o efeito microfinos provocado por estas partículas não-hidratadas podem produzir um maior empacotamento e preenchimento dos vazios da matriz e na interface, gerando um efeito parede que proporciona uma maior compacidade localizada, gerando assim, uma ligação mais eficiente entre pasta e o agregado.

Normalmente esses agregados reciclados absorvem mais que os naturais (CORINALDESI et al., 2002; SILVA et al., 2007; TAM e TAM, 2007 ; TAM et al., 2008; ABBAS et al., 2009; NENO, 2010; POON e KOU, 2010). Segundo Neno (2010) das características em que o agregado reciclado mais difere dos agregados convencionais é na absorção de água. Tal fato é explicado por Buttler (2003), Poon e Chan (2006), Pedrozo (2008) e Grubba (2009), devido à presença de argamassa aderida nos grãos do ARC. Segundo Saeed et al. (2007) a faixa de absorção para os agregados miúdos de concreto variam entre 4% a 8%.

De acordo com Silva et al. (2010), as partículas recicladas de forma lamelar e mais porosa, tendem a gerar uma melhor ligação com a pasta de cimento, preenchendo assim, alguns poros que antes seriam favoráveis a serem preenchidos por água. Neno (2010) afirma que em agregados com grãos lamelares a pasta de cimento preenche poros que possivelmente seriam preenchidos por água, alterando a absorção de água por capilaridade do novo concreto.

Segundo Lima (1999) a forma dos grãos influencia na trabalhabilidade, na coesão e no consumo de cimento. Em função do tipo de resíduo, dos processos de cominuição e dos equipamentos usados, o agregado reciclado pode apresentar forma mais lamelar e uma textura mais áspera do que os agregados convencionais, o que pode prejudicar seu uso em concretos e argamassas. Em trabalho realizado pelo autor, foi constatada a existência de “linhas de

fratura” devido à presença de partículas lamelares. Devido à forma e textura do agregado reciclado, pode ser necessária a adoção de maior teor de aglomerantes e de água, para que a trabalhabilidade seja alcançada.

O formato inadequado das partículas de areia reciclada, normalmente lamelar ou alongado, prejudica a trabalhabilidade de argamassas para revestimento (TRISTÃO, 2005; SILVA, 2006; CABRAL, 2007; TAM & TAM, 2007; FREITAS, 2010). Entretanto, segundo Lima (1999), quando se emprega o microfinos existente no material reciclado a perda de trabalhabilidade pode não ocorrer (embora outras propriedades possam ser prejudicadas). Este parece ser o caso das argamassas, onde a adoção de microfinos na mistura melhora as condições de aplicação.

Para tornar as partículas mais esféricas, existem no mercado novos equipamentos de britagem, como por exemplo, os britadores de eixo vertical (VSI), que proporcionam a fragmentação por meio de impacto, rocha contra rocha, sendo o produto final composto de partículas equidimensionais (ALMEIDA e BISPO, 2003, apud SILVA, 2006).

Tristão (2005) realizou estudos com argamassas e verificou alterações nas propriedades no estado fresco, em função dos parâmetros texturais das areias sendo que, quanto mais arredondado, esférico e menos rugosa a textura superficial, menor a quantidade de pasta necessária para garantir a trabalhabilidade das argamassas, o que implica em menor consumo de aglomerantes e de água de amassamento. Segundo o autor, a forma dos agregados para argamassa de revestimento deve ser representada através da determinação do arredondamento e da esfericidade. Existem diversos métodos para expressar esses coeficientes, alguns por comparação visual com imagens de padrões definidos e outros quantitativos (ARAÚJO, 2001; D’AGOSTINO, 2004; TRISTÃO, 2005; ARNOLD, 2011). Não se encontra na literatura um consenso de como deve ser determinado estes parâmetros de arredondamento e esfericidade.

O arredondamento e a esfericidade representam a forma do grão, segundo Tristão (2005). A ABNT NBR 7389:1992 especifica o procedimento para fazer uma análise qualitativa de agregados para concreto. De acordo com a norma, é necessário avaliar a forma do grão visualmente (auxílio de lupa), e comparar com os padrões gráficos que indicam o grau de esfericidade e arredondamento, conforme representado na Figura 3. Tristão (2005), explica que o arredondamento está relacionado com o grau de curvatura dos cantos e a esfericidade está relacionada com o quanto o grão se aproxima da forma esférica (alto ou baixo grau de esfericidade).

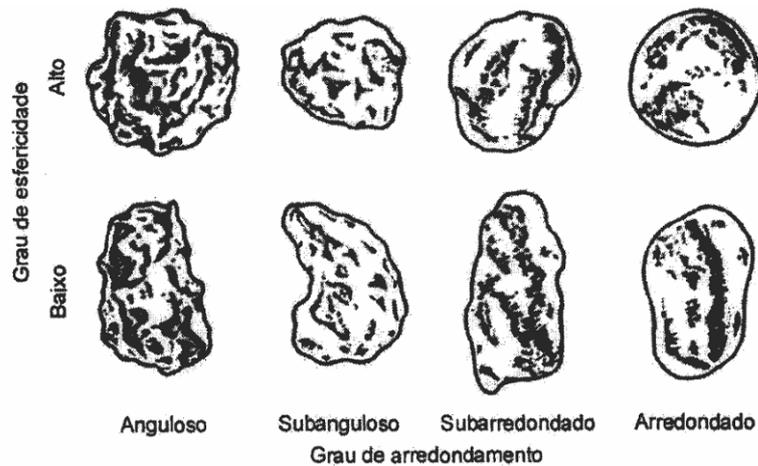


Figura 3 - Padrões gráficos dos graus de esfericidade e arredondamento.

Fonte: ABNT NBR 7389:1992.

Segundo Wadell (1936) apud Tristão (2005) a esfericidade pode ser expressa como a relação entre a área de superfície do grão pela área da superfície da esfera do mesmo volume do grão. Tristão (2005), utilizou para o cálculo de esfericidade a fórmula:

$$F_f = \frac{4\pi S}{P^2}$$

Onde:

F_f = esfericidade

S = área da projeção da partícula (mm^2)

P = perímetro da projeção da partícula (mm).

Suguio (1973) apud Tristão (2005) define grau de arredondamento como a média dos raios de curvatura dos cantos da projeção do grão dividida pelo raio máximo do círculo inscrito no grão, medida esta muito trabalhosa, que pode variar de (0-0,15) para grãos angulares e de (0,60-1,00) para grãos bem arredondados. Tristão (2005), utilizou para o arredondamento a fórmula:

$$A_r = \frac{4S}{\pi(d_{\text{máx}})^2}$$

Onde:

A_r = arredondamento

S = área da projeção da partícula (mm^2)

$d_{\text{máx}}$ = diâmetro máximo de Feret (mm).

Olszewski et al. (2004) dizem que a esfericidade está relacionada com a proporção de comprimento largura das imagens das partículas, enquanto que o arredondamento é expresso pela curvatura das arestas das imagens.

Segundo Araújo et al. (2003) e Silva et al. (2005) a mera caracterização da distribuição granulométrica dos agregados não é suficiente para evidenciar a influência que a forma dos grãos dos agregados provoca no desempenho das argamassas. Portanto, recomenda-se a adoção de procedimentos como a análise de imagem das partículas retidas nas peneiras normais para determinação dos parâmetros morfoscópicos dos agregados. A ferramenta de análise de imagem é recomendada por Araújo (2001), D' Agostino (2004), Olszewski et al. (2004), Tristão (2005) e Arnold (2011), devido a facilidade de automação dos dados. Olszewski et al. (2004) realizou uma análise dos grãos dos agregados através da aquisição e processamento de imagens com o uso de um scanner e posterior análise utilizando o software denominado UTHSCSA Image Tool. O software permite o cálculo de dados sobre a dimensão, a forma e a textura superficial dos agregados, a partir de parâmetros como a área, o perímetro, o comprimento do maior e do menor eixo e o diâmetro de Ferret, e fornece dados necessários para o cálculo de índices como arredondamento (dependente da rugosidade externa); esfericidade e alongamento, dependentes da média do comprimento do maior eixo (aresta). Arnold (2011) utilizou a aquisição de imagem para quantificação da área, perímetro e maior dimensão da projeção do grão, considerando a técnica eficiente.

c) Textura superficial

A textura superficial dos agregados está relacionada com a superfície do grão (TRISTÃO, 2005). O autor enfatiza que os parâmetros texturais dos agregados alteram as propriedades das argamassas no estado fresco, sendo que quanto mais arredondado, esférico e menos rugosa a textura superficial, menor a quantidade de pasta das argamassas, o que implica em menor consumo de aglomerantes e de água de amassamento. Carr et al. (1990) apud Tristão (2005), relacionam a textura superficial com área específica, pelo fato de um agregado com textura superficial rugosa ter maior área superficial do que um agregado similar com textura superficial mais lisa. Além disso, os autores afirmam que, quanto maior a área superficial, maior a quantidade de aglomerante a ser acrescentada na mistura para dar trabalhabilidade.

A ABNT NBR 7389:1992 classifica os agregados para concreto quanto à textura superficial em polida, fosca ou rugosa, propondo a adoção de uma avaliação visual dos agregados. A ASTM D 3398 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS,

2006) propõe uma metodologia diferente, utilizada para quantificar a textura superficial de grãos de agregados para pavimentação asfáltica, que fornece um índice para a forma das partículas e características de textura dos agregados. Este valor é uma medida quantitativa da forma do agregado e as características de textura, sendo uma medida indireta da rugosidade, pois avalia a textura superficial e a forma do grão. A ASTM C 1252 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2006) propõe um método para determinar o volume de vazios não compactados de agregados miúdos para concretos. Este método fornece uma indicação da influência angulosidade, esfericidade e textura superficial dos agregados em comparação com outros agregados de mesma distribuição granulométrica.

Rao e Prasad (2002) apud Tristão (2005) realizaram um estudo sobre a influência da rugosidade superficial dos agregados na interface entre a pasta de cimento e o agregado, relatando que a pasta próxima da interface exibe uma microestrutura mais porosa, devido ao efeito parede produzido pela superfície do agregado, criando zonas com altas relações água/cimento. De acordo com os autores, a resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da rugosidade do agregado. Destaca-se que Rao e Prasad (2002) não quantificaram a rugosidade superficial dos agregados, tendo utilizado uma avaliação descritiva como rugoso ou polido para identificar a textura superficial do agregado.

Para Tristão (2005), é necessário desenvolver estudos em argamassas para melhor entendimento da influência da textura superficial dos agregados uma vez que, em estudos para concretos e misturas asfálticas, a textura superficial interfere no consumo de pasta e nas resistências mecânicas.

2.3 ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

2.3.1 Influência do agregado miúdo de concreto nas propriedades das argamassas

A argamassa é composta fundamentalmente de agregados miúdos (materiais inertes) e uma pasta com propriedades aglomerantes (constituída de água e minerais, ou seja, materiais ativos). De acordo com Margalha (2010) e Arnold (2011), todos esses constituintes influenciam nas propriedades das argamassas, no estado fresco e endurecido. O agregado é inerte as reações químicas de endurecimento da argamassa, porém a interferência nas propriedades da argamassa fresca e endurecida ocorre pela distribuição granulométrica, teor de microfios, forma e textura superficial dos grãos.

Segundo Butler (2003), os agregados reciclados de concreto se diferenciam dos naturais principalmente por possuírem argamassa aderida à superfície dos agregados, o que

influencia as propriedades do agregado e do concreto confeccionado com ARC, resultando em menor massa específica e maior absorção de água.

A norma NBR 13281:2005 especifica os requisitos exigíveis para a argamassa utilizada em assentamento e revestimento. A argamassa de aplicação em revestimento deve atender aos requisitos físicos e mecânicos de resistência, como a resistência à compressão, a densidade de massa no estado endurecido, a resistência à tração na flexão, a coeficiente de capilaridade, a densidade de massa no estado fresco, a retenção de água e a resistência potencial de aderência à tração.

2.3.1.1 *Argamassas no estado fresco*

CARDOSO et al. (2005) afirmam que o desempenho dos revestimentos ao longo de sua vida útil está fortemente relacionado às características apresentadas no curto período correspondente ao estado fresco. O estudo destas propriedades denomina-se reologia, que investiga as propriedades e o comportamento mecânico de corpos que sofrem uma deformação (sólidos elásticos) ou um escoamento (fluido - líquido ou gasoso) devido à ação de uma tensão de cisalhamento num corpo sujeito a uma força constante. Os parâmetros analisados na reologia são: a trabalhabilidade, a consistência, a plasticidade, a coesão, entre outros (ARNOLD, 2011). Costa (2006) cita como fatores de influência do comportamento reológico: o teor de água, a tensão de escoamento, a distribuição granulométrica das partículas, sua morfologia, entre outros. Os termos trabalhabilidade, consistência, coesão e plasticidade, na construção civil, são usados para descrever o comportamento de matérias como argamassas e concretos no estado fresco (SOUZA, 2005).

a) Trabalhabilidade das argamassas

Segundo Carasek a trabalhabilidade é uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades como: a consistência, a plasticidade, a retenção de água, a coesão, a densidade de massa entre outros, sendo que para cada tipo ou função de argamassa, algumas destas propriedades podem ser mais importantes do que as outras.

A consistência é, sem dúvida, uma das propriedades que mais influencia a trabalhabilidade, no caso dos concretos, sendo esta propriedade influenciada por uma série de fatores, tanto internos (materiais constituintes) como externos (decorrentes do processo de aplicação e das características ambientais).

Para se produzir argamassas com agregados reciclados com trabalhabilidade satisfatória é necessária uma maior quantidade de água, em relação às argamassa com AN. A

explicação para a maior adição de água na mistura deve-se ao fato do agregado reciclado de concreto ser composto por materiais porosos como argamassas (que aderem ao agregado natural) e componentes de alvenaria, entre outros, apresentando taxas de absorção elevadas (mesmo os reciclados de concreto estrutural), afetando principalmente a trabalhabilidade da mistura (BUTTLER, 2003; NENO, 2010).

Uma das soluções proposta por Poon et al. (2004), para melhorar a trabalhabilidade das misturas com agregados reciclados é mudar a condição de umidade do agregado reciclado antes da mistura. A dosagem com agregado reciclado úmido diminuiria o efeito da absorção dos agregados e tornaria o concreto mais trabalhável.

b) Consistência e plasticidade

Souza (2005) menciona que a consistência e a plasticidade são as principais propriedades que determinam uma condição de trabalhabilidade das argamassas de revestimento. Segundo Carasek (2007), a consistência é a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas e a plasticidade é a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.

Em relação à consistência, a avaliação qualitativa que classifica uma argamassa como sendo seca, plástica ou fluida, ainda é discutida. Essa classificação procura incluir, em um só conceito, as definições de plasticidade e consistência. Em geral, estas duas propriedades são interligadas, mas, em determinados momentos, podem ser tratadas independentemente quando se analisa uma condição de trabalhabilidade. Os fatores que influenciam tais propriedades são: natureza e teor de aglomerante, granulometria da areia, bem como a dimensão das partículas, teor de água, teor de ar incorporado na mistura, natureza e teor dos aditivos empregados (incorporadores de ar, retentores de água), natureza e teor das partículas finas adicionadas às argamassas (finos argilosos, calcários), entre outros, segundo Souza (2005).

O ensaio mais utilizado para a determinação da consistência de uma argamassa é o índice de consistência pelo espalhamento na mesa (Flow table) (BAUER et al, 2005; SILVA, 2006). Este ensaio impõe à argamassa uma deformação através de vibração ou choque e mede ao mesmo tempo a consistência e a plasticidade, conforme a norma ABNT NBR 13276:2005, fixado em uma abertura de (260 ± 5) mm na mesa de consistência. Segundo Ferraris (1999), o tronco de cone e a mesa de consistência são métodos que ajudam a realizar a caracterização reológica de argamassas, porém não de modo completo, uma vez que nos ensaios apenas um

parâmetro é medido, a tensão de escoamento. Este ensaio, porém não possibilita a distinção entre a contribuição da tensão de escoamento e da viscosidade e necessita de uma maior sensibilidade por fornecer somente uma única medida como parâmetro reológico (BAUER et al, 2005; SILVA b, 2006). Segundo Bauer et al. (2005), existem equipamentos mais modernos do que a mesa de consistência, tais como reômetros e o ensaio squeeze flow, que permitem uma avaliação mais rica do comportamento reológico de argamassas, onde são estudados, inclusive, os parâmetros fundamentais relacionados com a trabalhabilidade (viscosidade e tensão de escoamento).

Freitas (2010) destaca a importância do ensaio de squeeze flow (ABNT NBR 15839:2010) para a reologia das argamassas e a partir deste, fazer uma analogia com a aplicação na prática, isto é, como irá se comportar a argamassa quando efetivamente empregada na execução do revestimento. Segundo o autor as argamassas com baixas cargas, provavelmente são de fácil espalhamento, porém podem ser excessivamente fluidas, apresentando baixa viscosidade, tal que não seja possível a aplicação de camadas espessas ou que a aplicação não possa ser imediata após o preparo. Já as argamassas com cargas intermediárias tendem a permitir uma maior produtividade, principalmente àquelas que não apresentam indícios do terceiro estágio. Em contrapartida, as argamassas que necessitam de cargas muito maiores para serem deformadas, possivelmente são de difícil aplicação resultando em baixa produtividade.

Arnold (2011), relacionou os resultados do squeeze flow com a opinião de um profissional durante a aplicação da argamassa na forma de revestimento de diversos substratos de cerâmica vermelha. Nas argamassas com ARC muito provavelmente esta metodologia deverá ser utilizada para verificar se há boas condições para aplicação.

Segundo Cardoso et al. (2005), a faixa de deformação e a intensidade dos estágios podem alterar de acordo com a composição dos materiais, teor de água, tamanho das partículas, presença de aditivos, e também, com a configuração de ensaio utilizado, entre outros.

Outro procedimento utilizado para avaliar a consistência é o método de penetração do cone, preconizado pela ASTM C 780 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2011).

Em relação às argamassas com incorporação de agregados reciclados Pedrozo (2008), Vegas et al. (2009) e Neno (2010), sustentam que a sua incorporação em argamassas

aumenta a exigência de água para a consistência ideal. Segundo estes autores, o fenômeno também é explicado pela maior absorção de água que os grãos reciclados demandam frente à AN. Os estudos de Topçu (1997) apud Buttler (2003) demonstram que para se manter as mesmas características de consistência do concreto natural, para as misturas com agregados miúdos e graúdos reciclados, é necessário acrescentar cerca de 15% a mais de água.

Em relação à plasticidade, Cascudo e Carasek (2006), mencionam que a plasticidade é fortemente influenciada pelo teor de ar da mistura, em que condiciona ao material uma “ação lubrificante” produzida pelas bolhas de ar (diminuindo o atrito interno), ela não tem uma correspondência direta e enfática com a tensão de escoamento.

c) Coesão

A coesão refere-se às forças físicas de atração existente entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante (CINCOTTO et al., 1995; CARASEK, 2007). A influência da cal sobre a trabalhabilidade e a consistência das misturas deriva das condições de coesão interna que a mesma proporciona em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado (CINCOTTO et al., 1995).

Em relação às argamassas com ARC, Neno (2010) menciona que as partículas de agregado de concreto possuem uma superfície específica maior e são mais angulosas e porosas do que a areia natural, criando assim, uma ligação melhorada com a pasta aglomerante. Além disso, estes resíduos contêm possivelmente alguma pasta de cimento anidro que, ao entrar em contacto com a água da nova mistura, passa a completar as suas reações hidráulicas e concluir a ligação química, fazendo assim com que haja mais coesão e resistência entre as partículas.

O autor complementa que dentre as argamassas com 100% de RCD, as misturas com ARC são as que possuem menos quantidade de água na sua composição para uma mesma quantidade de cimento, reduzindo-se assim o volume de vazios e aumentando a coesão entre as partículas e também maior resistência à argamassa e diminuindo assim a capacidade de absorção de água por capilaridade desta argamassa (NENO, 2010).

d) Teor de água

A água é um elemento fundamental na formulação das argamassas visto que reage com os aglomerantes, promovendo a sua hidratação e colocando em evidência as propriedades aglutinantes, conferindo ainda a consistência necessária à sua aplicação (CRUZ, 2008).

A principal ferramenta empregada pelo operário para fazer o controle da reologia das argamassas é o teor de água. Essa quantidade de água influencia toda a distribuição espacial dos sólidos na argamassa, afetando a porosidade, a formação da microestrutura e a variação volumétrica (retração), e, por conseqüência, a aderência (CARASEK et al., 2001). Segundo Carasek (2008) o teor de água das argamassas influencia na retração, aumentando-se a quantidade de água o volume proporcional de agregado será reduzido e, conseqüentemente, o de pasta aumentado, aumentando as possibilidades de fissuração.

Pedrozo (2008), Vegas et al. (2009) e Neno (2010), observaram que a incorporação de agregado reciclado aumenta a demanda de água para uma consistência ideal. Isto ocorre devido à maior absorção de água apresentada pelas partículas de agregado reciclado frente ao agregado natural. Segundo Vegas et al. (2009), este parâmetro influencia a trabalhabilidade e o desempenho mecânico de argamassas, pois, como a água evapora, pode gerar espaços vazios. Por esta razão, este parâmetro é crítico, sendo necessário definir um limite percentual ideal de agregado natural com agregado reciclado. Este parâmetro é estabelecido após se analisar a influência de cada percentual de substituição nas propriedades da argamassa, tais como a absorção do agregado, a consistência da argamassa fresca e a resistência à compressão da argamassa endurecida. Os autores acrescentam que não é aconselhável que o teor de água seja muito elevado, devido a ocorrência de maior retração por secagem, que pode causar fissuras.

Buttler (2003), observa ainda que a absorção de água do concreto é maior em misturas confeccionadas com agregados originários de resíduos de resistência elevada. Esse fato deve-se a maior quantidade de argamassa aderida a esses agregados.

Pedrozo (2008) afirma que é muito importante estudar a absorção de água dos agregados reciclados, quando utilizado estes agregados em concretos, pois a taxa de absorção interfere diretamente na relação a/c final das misturas. Caso a absorção não seja analisada, além da redução da relação a/c, haverá uma diminuição substancial da trabalhabilidade do material, deixando o concreto muito seco. Os valores de absorção do agregado reciclado dependem do tipo e forma de obtenção dos agregados, Tam et al., (2006) e Tam et al. (2008). Normalmente o agregado reciclado apresenta maior absorção do que o agregado natural. A absorção de água encontra-se aproximadamente entre 3 e 10 % para o agregado reciclado e menos de 1 até 5 % para os agregados naturais (TAM et al., 2006). Segundo os autores, esses valores de absorção podem variar de acordo com o tipo de agregado utilizado.

e) Tensão de escoamento

Cardoso (2009), tem estudado os parâmetros reológicos das argamassas, como a tensão de escoamento e a viscosidade, com a intuito de explorar o comportamento no estado fresco e poder prever o comportamento no estado endurecido.

De acordo com Niebel e Campitelli (2009), as características da deformação de uma argamassa estão associadas aos aspectos reológicos que são influenciados pela sua fluidez. De acordo com Carasek (2007), em relação aos aspectos reológicos das argamassas, a consistência, que diz respeito à sua maior ou menor fluidez, está associada à capacidade da mistura em resistir ao escoamento. Logo, argamassas de consistências mais fluidas representam misturas com menores valores de tensão de escoamento.

f) distribuição granulométrica

Conforme Angelim et al. (2003) a distribuição granulométrica das partículas influencia as propriedades reológicas das argamassas, interferindo na trabalhabilidade e no consumo de água e aglomerantes.

Segundo Pillegi (2001) e Antunes (2005), a distribuição granulométrica, assim como o processo de mistura e o estado de dispersão das partículas, determinam o espaço disponível para que a argamassa se deforme conforme a superfície onde está sendo aplicada (PILEGGI, 2001; ANTUNES, 2005).

Nas argamassas com ARC, a fração fina é representada, na sua maior parte, pelas partículas de cimento, e a fração graúda, pelo agregado miúdo, o que resulta usualmente em curvas de distribuição granulométrica diferentes das observadas em areias naturais de rio.

g) Morfologia do agregado

Além da granulometria, a forma do agregado é um parâmetro fundamental que influencia nas propriedades da argamassa, sendo que a maneira como o agregado é gerado influencia significativamente esta propriedade (BOUQUETY et al., 2007).

A morfologia dos grãos influencia a fluidez das suspensões aquosas de partículas sólidas, sendo que, quanto maior a irregularidade de forma, maior a viscosidade. Devido à baixa área específica, aos efeitos de massa, a movimentação das partículas mais grossas tem a tendência de influenciar na facilidade ao espalhamento da argamassa. A presença de partículas com elevada rugosidade superficial e formato assimétrico acentua o atrito durante as colisões, dificultando também o fluxo. Partículas rugosas dificultam o escoamento da argamassa, pois aumentam a força de atrito entre as partículas. Quanto menor o coeficiente de

alongamento, mais alongadas se apresentam as partículas, dificultando assim, o escoamento das argamassas, pois as arestas provocam maior choque e atrito entre os agregados, influenciando sua movimentação (TRISTÃO, 2005; COSTA, 2006; ARNOLD 2011).

2.3.1.2 *Argamassas no estado endurecido*

Em relação ao estado endurecido, Sabbatini (2000) coloca que as argamassas de revestimento são submetidas a solicitações como: movimentação volumétrica da base (umedecimento e secagem) provocada pela ação de agentes externos; deformação da base (deformação da estrutura e recalques das fundações); movimentação do revestimento por alteração de temperatura (dilatação e contração); retração do revestimento devida à diminuição de volume (perda de água para a base, evaporação e reações de hidratação do cimento).

Para Cardoso (2009), as propriedades das argamassas no estado endurecido é que definem o desempenho dos revestimentos em uso. Segundo o autor, a resistência mecânica, a permeabilidade e o módulo de elasticidade são considerados requisitos para garantir o desempenho das argamassas endurecidas.

a) Resistência mecânica

Quando se trata da resistência mecânica de uma argamassa com incorporação de agregado reciclado, segundo Corinaldesi e Moriconi (2007), as argamassas contendo areia natural e agregado reciclados como tijolo, concreto e RCD (tijolo, concreto e betume misturados), em geral, possuem menor resistência mecânica quando comparadas à argamassa de referência. No estudo referido, a mistura com agregado de concreto apresentou um resultado oposto, com maior resistência à flexão que a de referência, após a idade de 25 dias.

No estudo de Veigas et al. (2009), ocorreu uma queda nos valores obtidos na resistência mecânica à compressão e à tração na flexão das argamassas com ARC, tanto na resistência à tração na flexão, quanto na resistência à compressão. Na medida em que foram incorporados maiores teores de resíduos de concreto à mistura (10%, 20%, 25%, 50%, 75% e 100%), as densidades de massa no estado fresco e endurecido foram decrescendo e, simultaneamente, também as resistências mecânicas das argamassas decresceram. Com base nos resultados obtidos definiu-se um máximo de 25% de incorporação de resíduo à argamassa. A partir desta taxa de substituição é significativa a perda de resistência. O autor não explica os motivos deste comportamento.

Os resultados de resistência mecânica (à compressão e à tração na flexão) da pesquisa de Neno (2010), apresentam um comportamento crescente até atingir 20% de substituição, decrescem ligeiramente para 50% e voltam a crescer até alcançar a porcentagem de incorporação de 100% de ARC. Segundo o autor, dentre as argamassas com agregados provenientes de concreto, a argamassa com 100% de resíduo é aquela que possui menores teores de água na sua composição; ou seja: para a mesma quantidade de cimento, esta mistura contém menos água (relação a/c), reduzindo-se assim o volume de vazios e proporcionando maior coesão entre as partículas e maior resistência à argamassa.

Pedrozo (2008) menciona que a resistência do agregado reciclado não é a mesma que a do material que o originou tendo em vista que o agregado passou pelo processo de britagem, causando o aparecimento de fissuras. Conforme o autor, a porosidade elevada dos agregados reciclados pode ser atribuída, principalmente, ao resíduo de argamassa que adere ao agregado original. Esta característica afeta também outras propriedades da mistura de concreto e argamassa.

De acordo com Metha e Monteiro (1994), como a resistência mecânica de um material diminui exponencialmente com o aumento da porosidade, espera-se que diferentes lotes desses agregados resultem em concretos com grande variação de propriedades mecânicas. Dessa forma, espera-se que o mesmo possa ocorrer em argamassas com ARC.

b) Permeabilidade

A permeabilidade, propriedade relacionada com a porosidade e mais especificamente, com a conectividade e distribuição das dimensões dos poros, é uma das variáveis que mais influem na durabilidade da estrutura uma vez que a probabilidade de ocorrer o início da degradação do concreto através da penetração de fluidos agressivos é proporcional ao aumento da permeabilidade (PETRI, 2004).

Para Petri (2004) os poros possuem diversas origens, alguns são ocasionados pelos produtos de hidratação dos compostos cimentícios, outros são originadas pelo ar aprisionado durante a operação de lançamento do concreto (neste caso a argamassa) pela evaporação da água utilizada em excesso na fabricação da mistura ou ainda são devidas as microfissuras devido à exsudação, retração por secagem, expansão térmica e cura inadequada. Assim, quanto maior a quantidade de água adicionada à mistura e quanto menor o grau de hidratação da mesma maior será a porosidade.

A porosidade determina a permeabilidade, onde somente os poros maiores, chamados de macroporos contribuem para a mesma. Em relação à dimensão dos poros, é possível classificar em: poros capilares, que são subdivididos em macroporos (10µm a 50nm) e mesoporos (50 a 10nm) e poros do gel, que são de dimensões inferiores a 10nm. Os poros maiores (capilares) dos materiais cimentícios afetam na resistência e na permeabilidade, enquanto que os poros pequenos (do gel) influenciam na retração e na fluência (PETRI, 2004).

Segundo Petri (2004), quanto maior o teor de água adicionada à mistura, maior será a porosidade. Os poros responsáveis pela permeabilidade são os macroporos interconectados (10 µm a 50 nm), que formam uma rede de poros.

Silva et al (2010), descreveram que ao incorporarem agregado reciclado cerâmico em argamassas, os grãos reciclados, por possuírem uma forma lamelar e mais porosa, tendem a gerar uma melhor ligação com a pasta de cimento, preenchendo, assim, alguns poros que antes seriam preenchidos por água.

Neno (2010) ao incorporar resíduo de concreto em argamassas e comparar com a de referência, percebeu que a argamassa com AN apresentou o maior coeficiente de capilaridade e a mistura com 100% de ARC, o menor valor. O autor ressaltou que, dentre as argamassas com incorporação de 20%, 50% e 100% de ARC, as misturas com 100% de agregado reciclado apresentaram o menor teor de água na sua composição, fazendo assim, com que a quantidade de água livre no interior da argamassa seja menor, reduzindo o volume de vazios, aumentando a coesão entre as partículas e diminuindo assim, a capacidade de absorção de água por capilaridade desta argamassa.

Pedrozo (2008) observou um aumento de absorção capilar em argamassa com ARC. Segundo o autor, não se pode afirmar que o aumento da absorção capilar se deva unicamente à presença de agregados reciclados na mistura, mas a uma mudança na estrutura interna da argamassa decorrente da adição desses agregados reciclados.

c) Módulo de elasticidade

Sabbatini (2000), menciona que para a argamassa ter um bom desempenho, deve apresentar módulo de deformação compatível a cada função. Segundo o autor, as argamassas quando endurecidas necessitam acomodar a deformação causada pelos esforços internos ou externos de diversas origens e de retornar à dimensão original, sem se romperem, ou através

do surgimento de fissuras microscópicas que não comprometam o desempenho do revestimento em relação à aderência, estanqueidade e durabilidade do revestimento.

No estudo de Topço (2010), os módulos de elasticidade das argamassas com agregado reciclado cerâmico foram inferiores à argamassa de referência. O valor do módulo de elasticidade que se mostrou mais elevado foi obtido com a incorporação de 20% de resíduo e o valor menor foi com 90%. Segundo o autor, os motivos para isso são a estrutura porosa e o menor módulo de elasticidade do agregado reciclado, comparativamente ao da areia natural.

Para Neno (2010), o maior valor do módulo de elasticidade dinâmico não é positivo, pois o módulo de elasticidade está diretamente relacionado com a fissuração da argamassa. A redução no módulo de elasticidade, se não excessiva, é uma característica favorável para as argamassas, pois o revestimento fica mais deformável, uma vez que permite uma melhor acomodação das tensões e reduz a tendência para as fissuras (SILVA, 2006; SILVA et al., 2010). Contudo, o módulo de elasticidade não deve ser demasiado baixo, para evitar que as deformações do suporte danifiquem o próprio revestimento. Esta situação é agravada no caso de o módulo de elasticidade do revestimento ser muito superior ao do suporte, uma vez que o revestimento suportará as tensões de compressão mais fortes (PENAS, 2008). Dessa forma, esta propriedade influencia sobre o grau de aderência da argamassa à base e conseqüentemente, sobre a estanqueidade da superfície e a durabilidade (CINCOTTO et al., 1995).

Outro aspecto fundamental relacionado à durabilidade das argamassas e as propriedades no seu estado endurecido é a retração. O efeito físico de retração está associado a uma deformação na estrutura da pasta hidratada, decorrente de fenômenos de diferentes naturezas (BASTOS 2001). A principal causa da retração é a perda de água da pasta de cimento, através da evaporação ao ar e da sucção do substrato.

Além da perda de água, as causas da retração nas argamassas podem ocorrer em função de retração térmica, por carbonatação, por hidratação do cimento, e ainda por retração autógena (contração de volume que experimenta a água combinada quimicamente com o cimento) (BUIL et al. 1980 apud BASTOS, 2001).

A presença do agregado traz efeitos da restrição da retração da argamassa, principalmente nas primeiras horas após a mistura do material. Logo, é importante mencionar que a influência do agregado compromete na retração, uma vez que o teor de agregado na mistura e a sua distribuição granulométrica estabelecem a quantidade de pasta da argamassa e,

esta pasta é a parte da argamassa potencialmente responsável pela retração. O teor e a distribuição granulométrica ideal do agregado, do ponto de vista da retração, permitem a redução da quantidade de pasta com manutenção de trabalhabilidade adequada ao uso, e níveis de propriedades mecânicas no estado endurecido, que garantam o bom desempenho da argamassa (BASTOS, 2001).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental, desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) da Unisinos, buscou avaliar o comportamento da argamassa de revestimento com agregado miúdo reciclado de resíduo de concreto usado em substituição da areia natural (AN). Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos que compõem esta pesquisa, detalhando as fases experimentais realizadas para determinar a influência exercida pelos agregados miúdos reciclados de concreto (AMRC) numa mistura de argamassa.

Foram realizados ensaios de caracterização dos constituintes da argamassa de revestimento e ensaios de caracterização das argamassas, no estado fresco e endurecido.

Em um primeiro momento (fase 1), utilizou-se uma areia natural proveniente do rio Jacuí, região de Porto Alegre, como areia de referência, cuja distribuição granulométrica foi estudada e modificada por Arnold (2011), buscando otimizar a distribuição granulométrica deste agregado. Esta composição foi adotada nesta pesquisa para as AN e reproduzida na distribuição granulométrica das areias recicladas.

Nesta fase, foram realizados ensaios de caracterização dos ARC, oriundos de dois tipos de concretos extrusados, empregados na pré-fabricação de lajes alveolares e de estacas. O primeiro deles, na produção dos elementos, é submetido à cura convencional e o segundo é submetido à cura térmica à vapor. Os agregados provenientes do primeiro tipo de concreto foram denominados “agregados reciclados de cura convencional” (ARCC) e os agregados provenientes do segundo tipo de concreto foram denominados de “agregados reciclados de cura térmica” (ARCT) e foram utilizados em substituição ao agregado miúdo natural.

Na fase 2 foi estabelecido o proporcionamento dos materiais constituintes das argamassas, resultando no traço 1:1:6 de cimento, cal hidratada e areia seca, em volume. Nesta etapa foram analisadas as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido. Na Figura 4, tem-se o fluxograma experimental desta pesquisa.

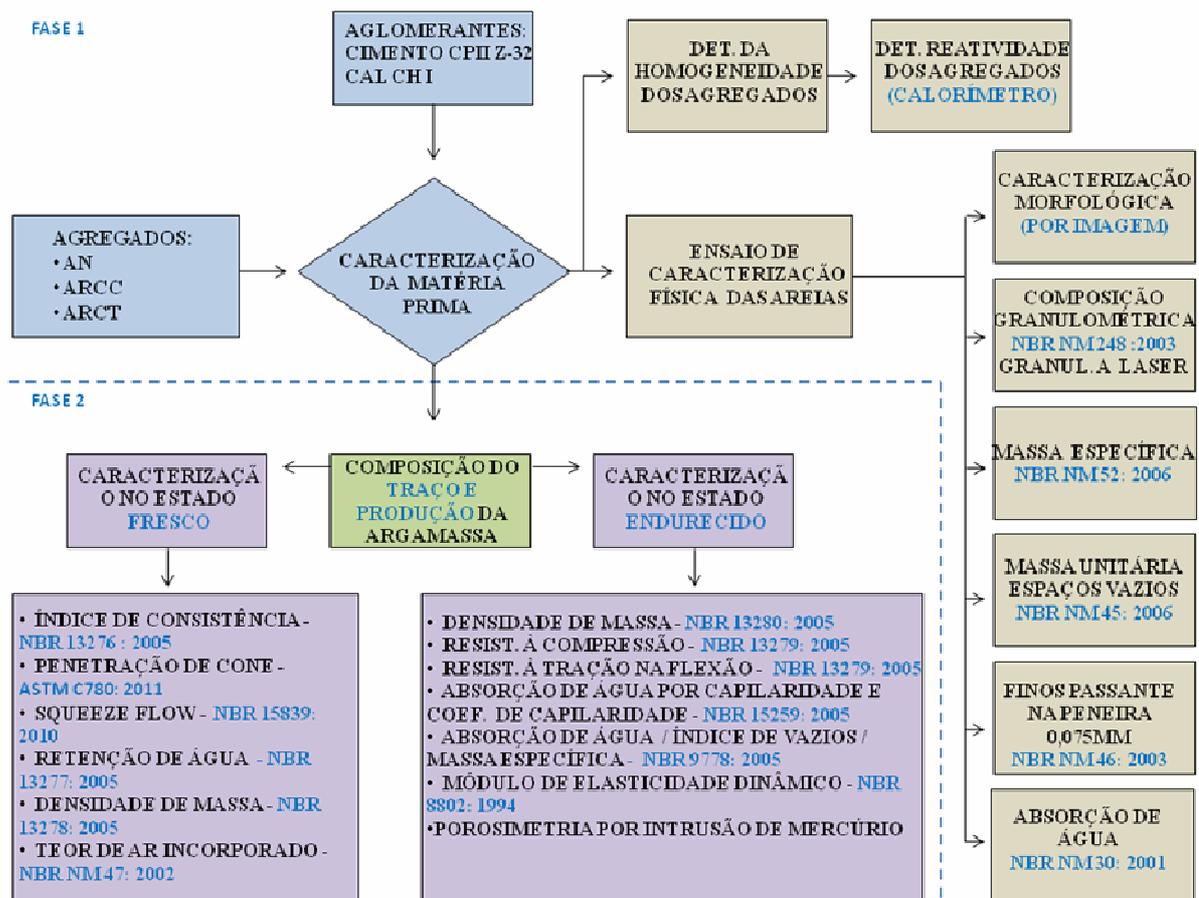


Figura 4 - Fluxograma do programa experimental.

O fator de controle empregado na pesquisa foi “tipo de agregado miúdo”, em número de 3. Os agregados miúdos diferem entre si na origem, forma, textura, absorção de água e são eles:

- areia Natural (AN);
- agregado miúdo reciclado de concreto submetido à cura convencional (ARCC);
- agregado miúdo reciclado de concreto submetido à cura térmica à vapor (ARCT.)

Os fatores fixos foram:

- distribuição granulométrica;
- teor de microfinos;
- traço da argamassa.

3.1 MATERIAIS

Esta pesquisa faz parte de um projeto de pesquisa de maior extensão sobre a influência das características de agregados no desempenho das argamassas de revestimento, desenvolvidos no curso de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Neste projeto já foram desenvolvidos diversos trabalhos, entre eles o de Arnold (2011) que estudou a influência da forma agregados miúdos em argamassas de revestimento. Assim, o presente trabalho, em continuidade ao projeto, empregou os mesmos aglomerantes e a mesma areia natural que empregados por Arnold (2011).

3.1.1 Aglomerantes

Os aglomerantes empregados na pesquisa foram o cimento Portland CP II Z - 32 e cal hidratada CH I. Na Tabela 3 são apresentadas as características físicas e químicas do cimento Portland CP II Z - 32, conforme a norma ABNT NBR 11578:1991.

Tabela 3 - Caracterização física, química e mecânica do cimento Portland CP II Z – 32.

Ensaio		Método de ensaio	Valores (%)	Limites ABNT NBR 11578:1997
Massa específica (kg/dm ³)		NBR NM 23	2,94	-
Finura	peneira # 200 (%)	NBR 11579	1,9	≤ 12
	peneira # 325 (%)	NBR 9202	6,8	-
Tempo de pega	Início (h:min)	NBR NM 65	03:50	≥ 1
	Fim (h:min)		04:45	≤ 10
Água Consistência (%)		NBR NM 43	32,2	-
Blaine (m ² /Kg)		NBR NM 76	471	≥ 260
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	NBR 7215	17,6	-
	3 dias		28,1	≥ 10,0
	7 dias		32,7	≥ 20,0
	28 dias		40,2	≥ 32,0
Composição química (%)	perda ao fogo	NBR NM 18	4,03	≤ 6,5
	resíduo insolúvel	NBR NM 15	13,75	≤ 16,0
	trióxido de enxofre (SO ₃)	NBR 14656	2,31	≤ 4,0
	óxido de magnésio (MgO)		5,68	≤ 6,5
	dióxido de silício (SiO ₂)		23,08	-
	óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		3,39	-
óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	6,91		-	
óxido de cálcio (CaO)	51,70	-		

Fonte: Votorantim (2010)

Observa-se que todas as especificações da norma ABNT NBR 11578:1991 foram cumpridas pelo fabricante.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física, química e os requisitos mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 7175:2003 para a cal hidratada CH I.

Tabela 4 - Caracterização física e química da cal hidratada CH I.

Ensaio		Métodos de ensaio	Valores	Limites especificados pela NBR 7175:2003
Massa específica (kg/dm ³)		NBR NM 23	2,40	-
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)		NBR NM 45	0,74	-
Finura	resíduo na peneira # 200 (%)	NBR 9289	8,3	≤ 10 %
	perda ao fogo		23,1	-
	resíduo insolúvel		7,0	-
Composição química (%)	óxido de magnésio (MgO)		28,6	-
	óxido de cálcio (CaO)	NBR 6473	40,9	-
	óxido totais (MgO +CaO)		90,4	≥ 90%
	óxidos totais não hidratados		12,8	≤ 10 %
	dióxido de carbono (CO ₂)		< 7	≤ 7%

Fonte: Hidracal (2010)

Na caracterização da cal hidratada, fornecida pelo fabricante, apenas o item óxidos totais não hidratados não atendeu aos limites especificados pela norma ABNT NBR 7175:2003, o que foi compensado pelo procedimento utilizado para o preparo da cal para a confecção da argamassa.

Para garantir a hidratação, a cal foi misturada com água e deixada em repouso pelo período mínimo de 24 horas antes do seu uso na forma de pasta na produção das argamassas. Este procedimento também foi adotado por Machado (2000), Tristão (2005) e Arnold (2011).

3.1.2 Água

Na produção das argamassas foi empregada água tratada, oriunda da rede pública da cidade de São Leopoldo/RS.

3.1.3 Agregados

O agregado miúdo natural empregado é de origem quartzosa, extraída no rio Jacuí, região de Porto Alegre-RS. Esta areia foi empregada como referência para a distribuição granulométrica dos agregados reciclados nas argamassas de revestimento.

Os agregados reciclados foram obtidos a partir de resíduos de concretos extrusados endurecidos, empregados na produção de elementos pré-fabricado, fornecidos pela empresa Pré Concretos Engenharia S/A, da cidade de Porto Alegre/RS. Os agregados foram

reciclados de concretos submetidos à cura convencional (ARCC) e à cura térmica a vapor (ARCT).

O resíduo de concreto foi beneficiado nos Laboratórios de Construção e no de materiais de Construção Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, em três etapas:

- desmonte das peças de concreto e redução até dimensões compatíveis com a abertura de alimentação do britador, com segregação da fração metálica;
- cominuição até a dimensão de agregados para concreto em britador de mandíbulas (BM);
- segregação dos agregados graúdos e miúdos, realizada pelo método de peneiramento, conforme a norma ABNT NBR NM 248:2003.

A fração miúda dos ARC foi submetida à secagem em estufa para remover a umidade e facilitar a separação dos microfinos das demais frações do agregado miúdo, que também foram separadas e armazenadas conforme as diversas frações granulométricas das peneiras da série normal e intermediária para agregados miúdos para argamassas.

O equipamento utilizado para a separação granulométrica, foi um agitador de peneiras da marca Kamacha, de dimensões de 50cm x 50cm e com tempo de vibração de 10 min para cada processo.

Os agregados miúdos reciclados e a areia natural foram previamente secas em estufa com temperatura de $(100 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ e posteriormente, estocadas em tonéis isolados de umidade e de fontes de calor. Todos os materiais foram armazenados no Laboratório de Materiais de construção LMC da universidade antes de sua utilização nos experimentos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

3.2.1 Caracterização morfológica por análise de imagem

Para análise da forma dos grãos dos agregados estudados, utilizou-se a metodologia proposta por Araújo (2001), Tristão (2005) e Arnold (2011), onde foi aplicado o uso de imagem digitalizada para obter a forma e textura superficial dos grãos de agregado miúdo.

Após a separação das frações granulométricas, pelo agitador de peneiras, foram adquiridas 400 unidades de cada uma das frações, de formas aleatórias, e dispostas sobre uma fita dupla face aplicada sobre uma lâmina de vidro translúcido. O vidro com a amostra foi colocado no interior de uma câmara escura com uma fonte luminosa e, com uma câmera

digital de alta resolução, foram adquiridos imagens para análise. Utilizou-se um paquímetro com abertura referencial de 150 mm como escala de referência. As Figuras 5 e 6 mostram as imagens fotográficas obtidas a partir desses procedimentos mencionados, para a fração retida na peneira de abertura 1,2mm.



Figura 5 - Amostra da AN, retida na peneira de abertura 1,2mm.



Figura 6 - Amostra do ARCT, retida na peneira de abertura 1,2mm.

As imagens dos grãos de areia foram analisadas no software “IMAGE TOOL” versão 2.0. Este programa, após fazer a leitura da imagem, possibilita a medição de cada grão quanto aos seus diâmetros, de maior e menor dimensão, perímetro e área superficial. A partir desses dados foi possível avaliar o coeficiente de arredondamento, alongamento e esfericidade dos grãos que compõem cada fração.

Através da área, perímetro e dimensão máxima das projeções dos grãos, foram calculados os parâmetros de forma dos agregados, tais como o arredondamento e a esfericidade. O arredondamento foi calculado a partir da Equação 1, através das imagens dos grãos.

$$A_r = \frac{4S}{\pi(d_{m\acute{a}x})^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Ar = arredondamento

S = área da projeção da partícula (mm²)

d_{máx} = diâmetro máximo de Feret (mm).

Fonte: Tristão (2005)

A esfericidade foi calculada a partir da Equação 2, através das imagens dos grãos.

$$F_f = \frac{4\pi S}{P^2}$$

Equação 2

Onde:

 F_f = esfericidadeS = área da projeção da partícula (mm²)

P = perímetro da projeção da partícula (mm).

Fonte: Tristão (2005)

3.2.2 Caracterização da distribuição granulométrica

a) Estudo prévio das distribuições granulométricas dos ARC

Com base na norma ABNT NBR NM 248:2003, realizou-se uma análise da distribuição granulométrica dos agregados provenientes de concreto, ARCC e ARCT, através da peneiras da série normal e intermediária, desde a peneira de abertura de malha 6,3 mm até o fundo. A caracterização do AN foi realizada e analisada por Arnold (2011).

As composições granulométrias da AN e dos ARC são apresentadas no Apêndice A, na Figura 7 e na Figura 8 são apresentados os gráficos das porcentagens de massa retida e retida acumulada, respectivamente, da areia natural AN, do agregado reciclado de concreto proveniente de laje (ARCC) e ainda, o concreto proveniente de Estaca (ARCT).

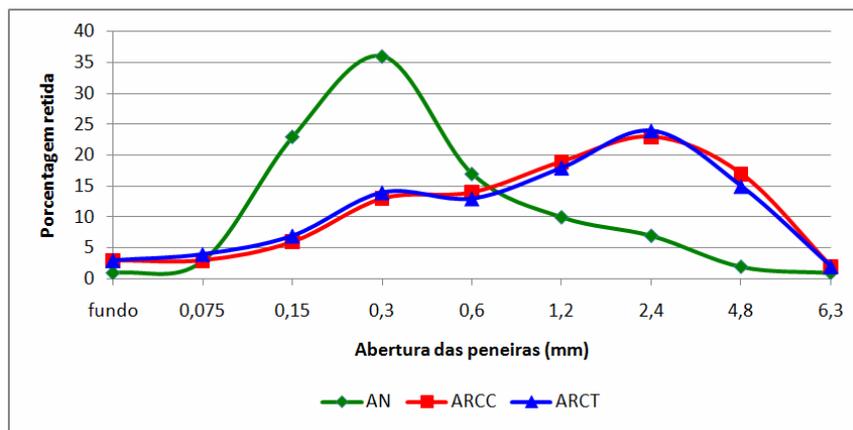


Figura 7 - Distribuição granulométrica – porcentagem retida nas peneiras.

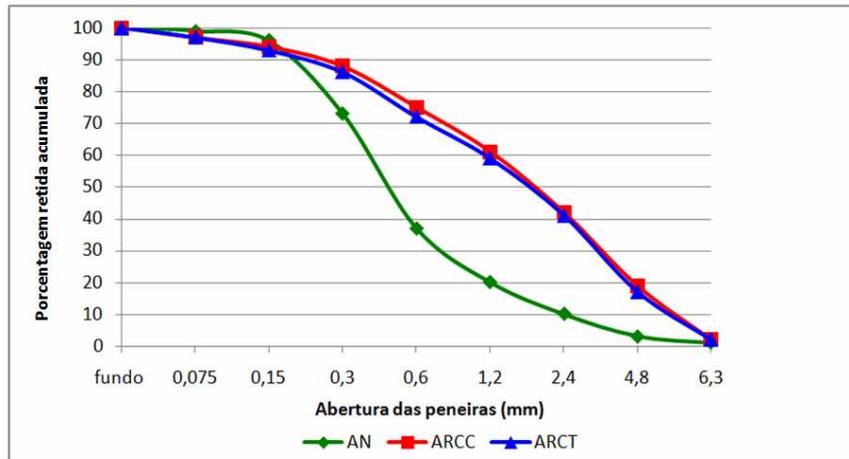


Figura 8 - Distribuição granulométrica – porcentagem retida acumulada nas peneiras.

Uma distribuição granulométrica similar foi encontrada nos estudos de Lima (1999) e Leite (2001).

De acordo com os dados obtidos no peneiramento dos grãos, ambos os agregados reciclados de concreto são muito semelhantes entre si, porém quando comparados com a distribuição granulométrica da areia natural, existem diferenças significativas. Segundo Arnold (2011), a AN possui maior quantidade de grãos nas peneiras de menor dimensão, ou seja: nas peneiras de 0,30 mm (36%) e de 0,15mm (23%). Nesta pesquisa, observou-se que os agregados reciclados de concreto possuem maiores quantidades de grãos retidos nas peneiras de maior dimensão. A caracterização do ARCC mostrou uma massa retida de 23% na peneira 2,4 mm, de 19% na peneira 1,2 mm, seguida de 17% na peneira 4,8 mm e para ARCT tem-se 24% na peneira 2,4 mm, 18% na peneira 1,2 mm e 15% na peneira 4,8 mm.

Ao analisar a distribuição granulométrica da AN utilizada nesta pesquisa e equiparar com as curvas granulométricas dos estudos de Salvador (2005), Silva (2006), Sampaio e Bastos (2009), Freitas (2010) e Arnold (2011) todos os estudos possuem agregados naturais com maiores concentrações de grãos retidos na peneira de abertura de malha 0,3 mm. Ao equiparar a curva granulométrica dos agregados reciclados neste trabalho com os ARC do estudo de Neno (2010), percebe-se a semelhança na composição, onde há maiores concentrações de partículas nas peneiras de malha maiores, tais como 2,4 mm, seguida da 1,2 mm e 0,6 mm.

Como um dos objetivos do trabalho é analisar a influência da forma do grão das areias recicladas de concreto, sobre as propriedades da argamassa de revestimento no seu

estado endurecido, as curvas das areias ARC foram alteradas de modo a reproduzir a distribuição granulométrica da AN nas demais areias recicladas.

b) Ajuste da distribuição granulométrica

As areias utilizadas neste estudo foram previamente secas em estufa a uma temperatura aproximada de $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$, para então serem submetidas a um processo de peneiramento, com o objetivo de separar os agregados com dimensão superior e inferior a 2,4mm. A fração passante na peneira 2,4 mm foi então segregada nas dimensões retidas nas peneiras de abertura de malha 1,2mm; 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm; 0,075mm e fundo da peneira, os quais foram utilizados para a confecção das argamassas em estudo nesta pesquisa.

Para obter a distribuição granulométrica da AN com o melhor empacotamento, buscou-se a maior massa unitária da mistura desses agregados, conforme definido por Arnold (2011). Esta composição está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Empacotamento dos grãos da AN.

Composição	Porcentagem retida (%)					Massa Unitária (Kg/m ³)
	#1,2 mm	#0,6mm	#0,3 mm	#0,15mm	#0,075mm	
1 original	10,8	19,5	41,0	25,8	2,9	1487,49
2 90%>#0,6mm	32,2	57,8	5,9	3,7	0,4	1470,91
3 80%>#0,6mm	28,6	51,4	11,8	7,4	0,8	1491,46
4 70%>#0,6mm	25	45	17,6	11,1	1,3	1504,79
5 60%>#0,6mm	21,4	38,6	23,5	14,8	1,7	1509,94
6 50%>#0,6mm	17,9	32,1	29,4	18,5	2,1	1511,82
7 40%>#0,6mm	14,3	25,7	35,3	22,2	2,5	1487,72
8 30%>#0,6mm	10,7	19,3	41,1	25,9	3	1482,76
9 20%>#0,6mm	7,1	12,9	47	29,6	3,4	1461,33
10 10%>#0,6mm	3,6	6,4	52,9	33,3	3,8	1436,68

Fonte: Arnold (2011).

A distribuição granulométrica ideal da AN definida por Arnold (2011) foi a composição “6”. A partir desta composição fez-se a reprodução da mesma para as demais areias, tendo como objetivo eliminar a variável da distribuição granulométrica dos grãos e permitir a análise da influência da forma dos grãos do agregado miúdo no desempenho das argamassas.

c) Dimensão máxima característica dos agregados

A dimensão máxima utilizada neste estudo para estas areias foi de 4,8mm.

d) Microfinos

Primeiramente foram analisados os teores de microfinos existentes nos agregados, com base na norma ABNT NBR NM 46:2003 para determinação do material fino que passa na peneira 0,075mm por lavagem. O procedimento foi aplicado para todas as frações de grãos separadamente, de modo a obter o teor de microfinos aderido nos grãos. Isto foi necessário, pois os agregados reciclados de concreto (ARC), não foram lavados para evitar uma eventual hidratação da fração anidra do cimento existente na argamassa dos grãos reciclados.

De cada fração de agregado segregada foram coletadas duas amostras de 50 gramas, que foram dispostas em estufa com temperatura de $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$, até a constância de massa. Na sequência, cada amostra foi colocada em uma peneira de abertura de malha igual a 0,075mm, e lavada em água corrente, até que a água passante pela peneira saísse transparente, eliminando assim os finos presentes na amostra. Em seguida, as amostras foram colocadas novamente na estufa até a obtenção da massa constante. A diferença de massa entre a amostra original e a lavada, representa o teor de microfinos aderido no agregado. Na Tabela 6 são apresentadas as porcentagens aderidas em cada fração das areias estudadas e o total de microfinos retido nas mesmas.

Tabela 6 - Porcentagem de microfinos em cada fração dos agregados.

agregados	Teor de microfinos (%)				
	#1,2 mm	#0,6mm	#0,3 mm	#0,15mm	#0,075mm
1 AN	0,6	1,0	2,8	3,4	19,8
2 ARCC	2,8	2,8	3,6	13,2	52
3 ARCT	2,8	3,2	3,2	14,2	55,2

Para determinar o teor de microfinos a ser utilizado nas misturas, definiu-se o teor de microfinos aderido aos grãos de cada tipo de areia e adotou-se como padrão para todas as areias o maior valor total de microfinos aderido encontrado, no caso o da areia ARCT (6,25%). Os procedimentos para determinar o teor de microfinos em cada areia, encontra-se no Apêndice B.

Para a padronização dos teores de microfinos para cada agregado, estabeleceu-se o teor de 6,25% de microfinos. Logo, foram acrescidos 3,95% de microfinos na AN e 0,25% de microfinos no ARCC, cada um com seus respectivos microfinos. Na Tabela 7 são apresentados os teores de microfinos acrescidos para cada agregado de modo a obter o mesmo percentual de microfinos.

Tabela 7 - Teor de microfinos adicionado para cada agregado.

agregado	Teor de microfinos estabelecido = 6,25%	
	Teor aderido de microfinos (%)	Teor acrescido de microfinos (%)
AN	2,3	3,95
ARCC	6,0	0,25
ARCT	6,25	0

e) Distribuição granulométrica dos microfinos por granulometria a laser

Para uma caracterização mais aprofundada dos microfinos reciclados de concreto, fez-se necessário realizar os ensaios de granulometria a laser, para a obtenção das curvas de distribuições granulométricas completas.

Para estes ensaios, foram separados 100 g de microfinos da AN e de cada amostra de agregado reciclado, ARCC e ARCT, os quais foram obtidos a partir do processo de peneiramento - fração passante na malha 0,075 mm. Esses materiais coletados, antes de seguirem para a análise granulométrica a laser, foram devidamente identificados e secos em estufa.

O equipamento utilizado foi um Analisador de Partículas SPECTROPHOTOMETER CM-2600d, modelo MINOLTA, com capacidade de detecção de tamanhos de partículas situadas entre 0.04 a 500 μm , do Laboratório de Processamento Mineral - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, nas seguintes condições de análise: dispersão em álcool isopropílico (agregados reciclados) e água (agregado natural). Os gráficos das Figura 9, da Figura 10 e da Figura 11 apresentam a curva e o histograma de distribuição granulométrica do microfinos da AN e dos ARCC E ARCT, respectivamente. Na Tabela 8 encontram-se os valores típicos da caracterização da granulometria dos finos por difração laser. No Apêndice C encontra-se o relatório da caracterização.

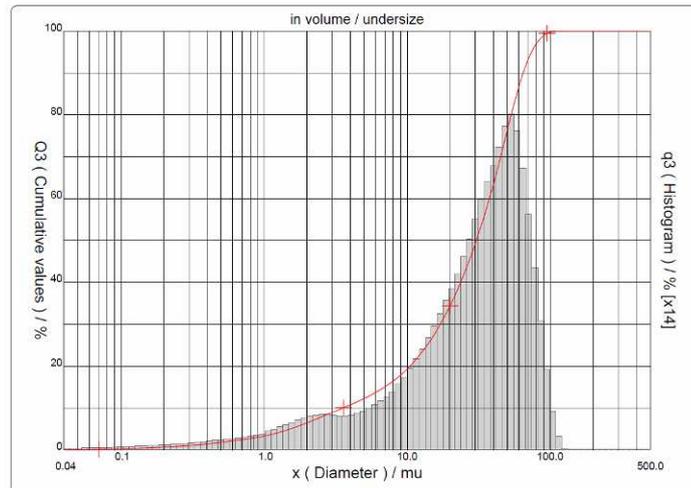


Figura 9 - Distribuição granulométrica dos microfios de AN.

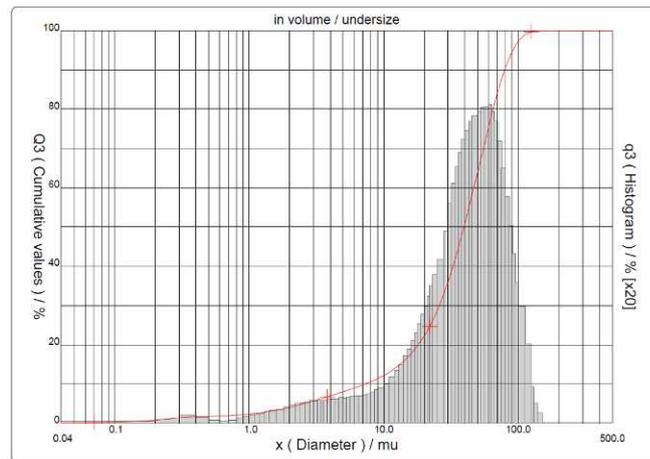


Figura 10 - Distribuição granulométrica dos microfios de ARCC.

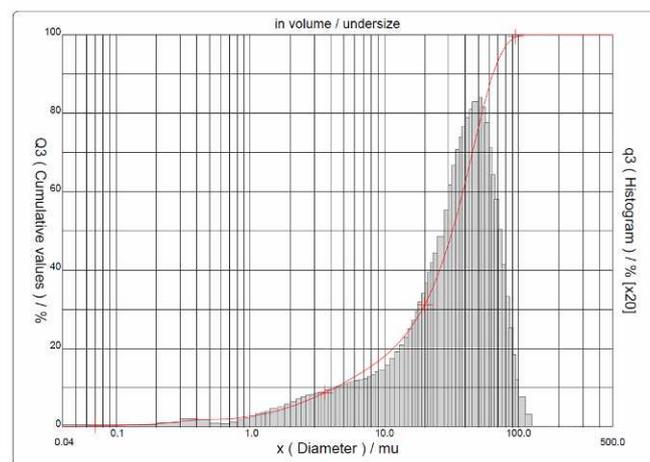


Figura 11 - Distribuição granulométrica dos microfios de ARCT.

Tabela 8 - Valores típicos da caracterização por granulometria laser dos microfinos.

Dimensão (µm)	Tipo de agregado		
	AN	ARCC	ARCT
D90%	64,85	79,29	64,56
D50%	30,54	39,54	32,19
D10%	3,53	7,25	4,27
Dimensão média	33,00	42,40	33,83

De acordo com os ensaios realizados de distribuição granulométrica a laser, é possível dizer que existe uma porcentagem de microfinos com dimensões maiores que a peneira de abertura 0,075mm. Isto mostra que a utilização do peneiramento para caracterização da granulometria dos agregados não é suficiente, a partir desse método é preciso considerar que, em função da forma lamelar de algumas partículas, os grãos podem passar longitudinalmente pela malha quadrada da peneira 0,075mm, distorcendo informações relativas a maior dimensão do mesmo.

Observa-se que, 90% das partículas da areia natural e do ARCT apresentam dimensão inferior a 65 µm. Ambos agregados também apresentam valores próximos para D50% e para D10%. Em contrapartida, as partículas do ARCC apresentam aos 90% dos grãos passantes na dimensão 80 µm, aos 50% 40µm. Isto significa que AN e ARCT são muito semelhantes entre si e apresentam dimensões médias em torno de 33µm para as partículas da AN e 34 µm para os ARCT. Já os ARCC demonstraram ser mais grossos que os demais, uma vez que apresentaram dimensão média de 42 µm.

f) Determinação da massa unitária e específica, espaços vazios, absorção de água e material microfino

A caracterização dos agregados também foi realizada em função da massa unitária no estado solto, massa específica, conteúdo de espaços vazios, determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem e ainda a determinação da absorção de água, conforme as normas brasileiras específicas. Estas características são mostradas na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização física dos agregados.

Ensaio	Norma	Resultados		
		AN	ARCC	ARCT
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52	2,48	2,53	2,53
Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	NBR NM 45	1475	1368	1369
Conteúdo de espaços vazios (%)	NBR NM 45	40,70	45,92	45,88
Finos passante na peneira 75 µm, por lavagem (%)	NBR NM 46	1,50	3,34	4,99
Determinação da absorção de água (%)	NBR NM 30	2,10	5,34	7,48

De acordo com os valores amostrados na Tabela 9, percebe-se que os agregados reciclados, ARCC e ARCT, possuem o mesmo valor de massa específica e ambos são superiores que a AN. Quanto à massa unitária no estado solto, a AN apresenta-se superior às demais areias, e seguido desta, encontra-se o ARCT. O conteúdo de espaços vazios dos ARCC são superiores a dos ARCT, que por sua vez são superiores a da AN. O material fino que passa através da peneira 75 μm do ARCT é superior a do ARCC e ambos são superiores ao existente na AN. A diferença de quantidade de material fino (variando de 2 % a 3,5%) deve-se ao fato das diferentes formas de obtenção dos agregados, onde todo o agregado que passa pelo processo de britagem resulta em maiores quantidades de finos em função do tipo de fratura que ocorre na cominuição. Ao analisar a absorção de água dos agregados reciclados é possível dizer que ambos os agregados reciclados absorvem mais água do que o AN. Os agregados reciclados também possuem mais material fino que passa através da peneira 75 μm e maior conteúdo de espaços vazios. Acredita-se que a existência da argamassa aderida nos ARC influencia nos resultados.

Ao analisar os dados dos ensaios de massa específica dos ARC em relação à AN é possível verificar que os primeiros apresentam valores maiores do que o último, assim como o conteúdo de espaços vazios. Já a massa unitária observada é menor para os agregados reciclados em relação à AN. Este resultado provavelmente se deve à forma mais lamelar dos resíduos, justificando o conteúdo de espaços vazios, o qual está diretamente relacionado com a massa unitária. Ao analisar o material fino passante na peneira 0,075mm, este está relacionado com a dureza do material, percebe-se que tem muito mais material que desagrega nos ARC e mais material fino aderido à superfície dos agregados do que na areia natural. Isto ocorre possivelmente, devido aos grãos reciclados serem mais rugosos aderindo mais material na superfície. Outro fator que pode explicar a quantidade de material fino existente nos ARC é o tipo de moagem, onde o britador utilizado talvez não seja o mais recomendado para este material

A Figura 12 mostra uma ampliação dos grãos naturais e dos grãos de ARCT, retidos na peneira de abertura 1,2 mm, onde é possível visualizar a rugosidade superficial dos grãos reciclados.

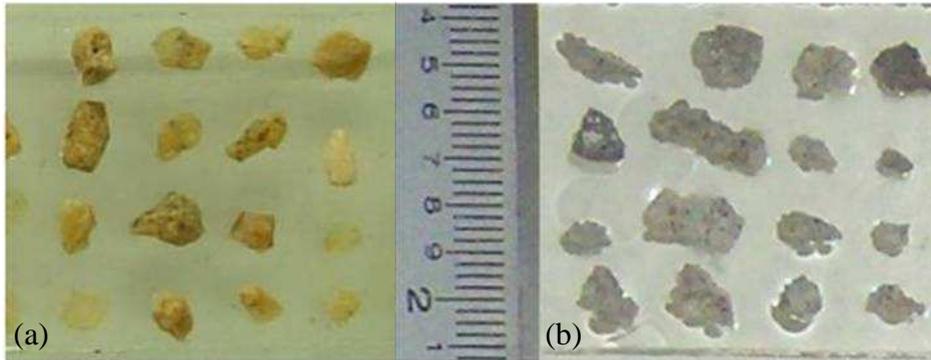


Figura 12 - Análise visual da rugosidade superficial dos grãos: (a) AN e (b) ARCT.

g) Determinação da argamassa aderida nos agregados reciclados

Para determinar a quantidade de argamassa aderida nos grãos dos ARC, segundo Ferreira (2007), faz-se necessário aplicar um choque térmico às partículas, de modo a provocar tensões internas nos agregados (desintegração e separação dos componentes).

Para o ensaio utilizou-se aproximadamente 1 kg de cada agregado reciclado da fração retida na peneira 4,8 mm. As amostras foram submetidas à secagem em estufa em temperatura de 100 ± 5 °C até constância de massa. As amostras foram pesadas e colocadas em um forno mufla com temperatura pré-aquecida de 800 °C, por aproximadamente 3 horas. Imediatamente após a retirada da amostra do forno mufla o material foi derramado em um tanque com água fria sobre uma tela metálica (Figura 13a). Após o resfriamento, o material foi removido da água e foi eliminado o excesso de água, para então colocar-se a amostra novamente na estufa a uma temperatura de 100 ± 5 °C por 24h. Obtida a massa constante, a amostra foi envolta em um pano e com a ajuda de um martelo de borracha (tendo o cuidado para não quebrar os agregados naturais), provocou-se a desintegração agregado/argamassa (Figura 13b). Em seguida foi realizado o peneiramento do material de modo a eliminar o material passante na peneira de malha 4,8 mm e coletado a massa final da amostra.

Uma segunda etapa de desintegração e separação da argamassa aderida nos ARC foi realizada seguindo o método proposto por Sanchez (2004). O ensaio consiste na imersão da amostra que ficou retida na peneira de malha 4,8 mm (do ensaio anterior), em uma solução de ácido clorídrico em temperatura ambiente, o ácido conduz à desintegração e separação da argamassa aderida ao agregado reciclado de concreto.

Inicialmente as amostras foram submersas no ácido clorídrico P.A. (para análise) por 72h (Figura 13c), para ocorrer a dissociação do cimento e a dissolução da argamassa aderida aos grãos. Após o período de imersão, os agregados foram retirados do ácido e

lavados. Após secos em estufa à temperatura de 100 ± 5 °C por 24h, e então esfriados. Por fim, foi realizado o peneiramento dos agregados, eliminando as partículas de dimensão inferior a 4,8mm. Registrou-se então, a massa final dos grãos. A Figura 13 (d) mostra o material seco em estufa após o ataque químico.

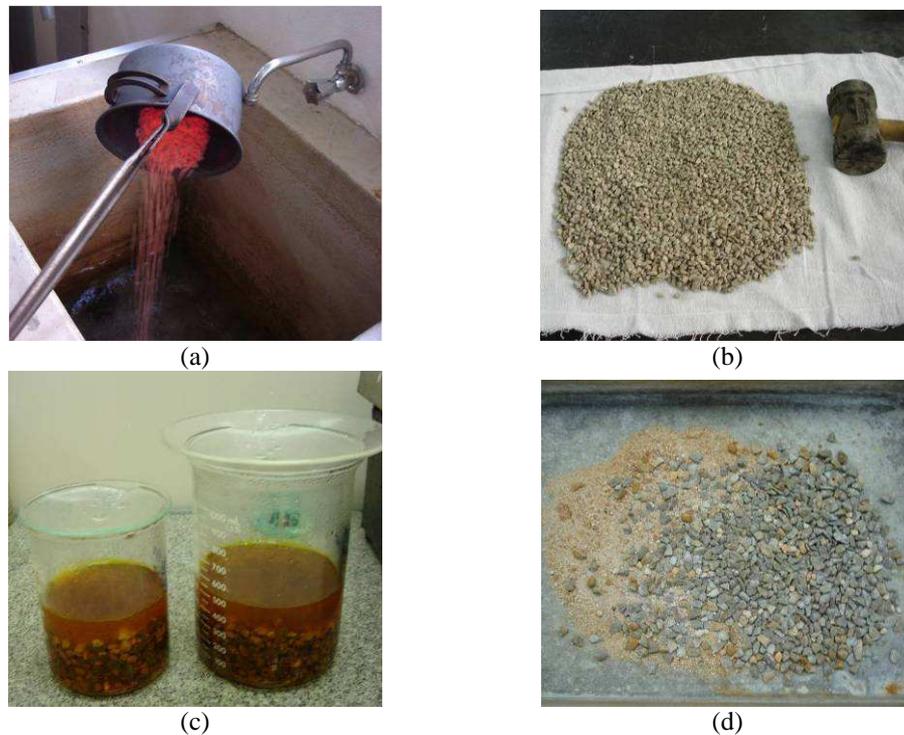


Figura 13 - Ensaio de caracterização do teor de argamassa aderida nos ARC: (a) imersão do ARC em água, após aquecimento em forno mufla; (b) desintegração agregado/argamassa com martelo de borracha; (c) imersão em ácido clorídrico; (d) material após ataque químico.

A Tabela 11 mostra os valores obtidos após os ensaio de choque térmico e ataque ácido nos agregados reciclados de concreto.

Tabela 10 - Argamassa aderida nos agregados.

agregado	Choque térmico		Massa aderida (%)
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	
ARCC	1.019,5	437,58	57
ARCT	1.203,3	269,39	78
agregado	Ataque químico		Massa aderida (%)
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	
ARCC	437,58	103,14	76
ARCT	269,39	139,31	48

Após realizar os dois ensaios de caracterização da argamassa aderida nos ARC e analisar a massa inicial do primeiro procedimento (choque térmico) e a massa final do segundo procedimento (ataque químico), é possível dizer que 90 % dos ARCC e 88 % dos

ARCT, são compostos por argamassas aderidas nos grãos. Apenas 10% aproximadamente são agregados naturais.

h) Determinação da reatividade dos ARC – monitoramento da temperatura semi-adiabática

O ensaio de monitoramento da evolução da temperatura semi-adiabática foi realizado com o intuito de verificar a reatividade dos agregados ARCC e ARCT em função de uma eventual existência de cimento anidro. A presença de cimento anidro em contato com água pode desencadear reações de hidratação, que pode ser monitorada pela evolução da temperatura. Para este experimento, foram separadas duas amostras de 200g para cada tipo de areia, sendo que em cada amostra foi adicionada 112g de água. Cada mistura foi colocada em um porta-amostra de 350 ml, dispostos em uma câmara semi-adiabática, e instrumentadas com termopar tipo K. O monitoramento da temperatura foi realizado empregando-se uma interface de aquisição de dados (PicoLog), e teve início após 8 min da adição da água e foi conduzido por um período de 24 horas após a mistura.

3.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Para a confecção do revestimento de argamassa, foi estabelecido o traço em volume de cimento, cal hidratada e areia seca 1:1:6, obtido a partir do estudo piloto realizado no trabalho de Arnold (2011). Estabelecido o traço em volume, fez-se a proporção para os valores em massa dos constituintes. Para os três agregados, AN, ARCC e ARCT, fizeram-se necessário adotar uma compensação visando à manutenção do mesmo volume de agregados em função das diferenças de massa específica entre os agregados.

A produção e os ensaios das argamassas foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção - LMC - de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. As condições ambientais do laboratório (sala climatizada), para a confecção das argamassas e condução dos ensaios, foram controladas com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 70 ± 10 %. O equipamento utilizado para a produção das argamassas, foi uma argamassadeira de eixo vertical, com capacidade para 5l de material, da marca EMIC, que permitiu produzir as argamassas dentro da sala climatizada, com umidade e temperatura controlada.

Definiu-se inicialmente que o teor de água das argamassas seria estabelecido a partir da penetração de cone, mas em função dos resultados do estudo piloto verificou-se que houve uma variação muito grande então estabeleceu-se utilizar a mesa de consistência. Foi

desenvolvido um estudo piloto, onde se definiu fixar o teor de água necessário para uma consistência de (260 ± 5) mm para a AN. Em seguida, foi determinada a profundidade de penetração de cone equivalente (52,66 mm). A partir desse valor, procurou-se determinar a quantidade de água das demais misturas. Os ensaios de penetração de cone foram realizados sempre 8 min após adição do cimento com a mistura de areia com a pasta de cal e a água. Todos os parâmetros foram fixados e mantidos neste ensaio.

Para a preparação da cal, foi determinada a quantidade de água necessária para atingir consistência pastosa e este teor foi utilizado em todas as misturas. A pasta foi obtida da mistura de cal seca em pó e água, realizada ao menos 24 horas antes do seu uso.

A sequência e o tempo de mistura dos materiais foram determinados e mantidos constantes em todas as misturas de argamassa. Este procedimento foi adaptado da norma ABNT NBR 13276:2005, e, considerando que uma parcela da água da mistura é introduzida na forma de pasta de cal, consiste em introduzir no misturador a parcela restante da água dosada, a cal em pasta e a areia. A homogeneização do material foi realizada durante 2 min, em velocidade baixa e, em seguida, foi acrescentado o cimento e novamente feito a homogeneização por mais 2 min. Esse tempo de mistura foi estabelecido a partir de testes pilotos, que apresentaram visualmente menores quantidades de ar incorporado na argamassa. Segundo Bauer et al. (2005), o tempo de mistura dos constituintes da argamassa é extremamente importante, pois quanto maior for o tempo de homogeneização dos materiais, maior será o teor de ar incorporado na mistura.

Os resultados do estudo piloto das argamassas com ARCC para fixar o teor de água são apresentados no Apêndice D e o gráfico da Figura 14 mostra o ajuste linear destes dados, mostrando a relação entre teor de água e índice de consistência pela penetração de cone.

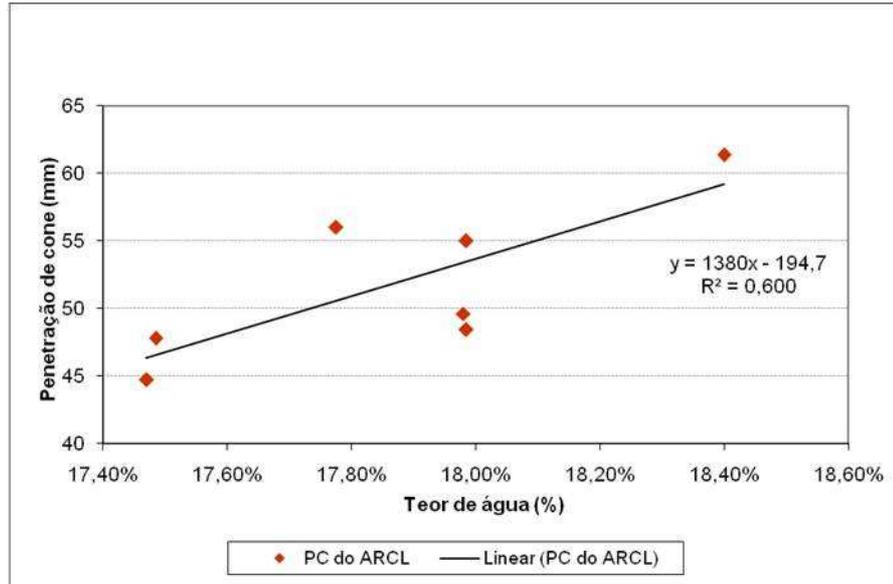


Figura 14 – Índice de penetração do cone em função do teor de água adotado.

Observa-se que há uma grande dispersão de resultados e o coeficiente de determinação R^2 de 0,60 indica que as variáveis independentes explicam apenas 60% dos dados ajustados relacionam-se conforme um ajuste linear. Com base nestes dados, percebeu-se que para a mesma quantidade de água existe diferença de até 7 mm entre os resultados dos ensaios.

Como o agregado ARCC não apresentou repetibilidade no ensaio, decidiu-se utilizar a mesa de consistência como parâmetro para a fixação da quantidade de água para todas as argamassas do presente estudo. O padrão proposto pela norma ABNT NBR 13276:2005 para fixação do índice de consistência é de (260 ± 5) mm, o qual foi seguido em todos os ensaios.

Apesar da dispersão de resultado do ensaio de penetração de cone, este ensaio foi realizado em todas as argamassas, juntamente com a densidade de massa, os quais serviram como referencial em todas as argamassadas confeccionadas neste estudo.

3.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Tendo como finalidade a comparação das propriedades das argamassas com os diferentes agregados miúdos utilizados (AN, ARCC e ARCT) foi fixado o índice de consistência e realizados ensaios de trabalhabilidade (penetração de cone e squeeze flow), retenção de água, teor de ar incorporado, densidade de massa e massa específica no estado fresco.

Para todas as argamassas, o tempo de início de cada ensaio foi fixado em 6min 30s para o ensaio de índice de consistência, 8min para o teor de ar incorporado, 8min 30s para a penetração de cone, 15min para o ensaio de squeeze flow, 15min 31s para a retenção de água, sempre a partir do contato da água com o cimento. Após os ensaios de mesa de consistência e penetração de cone, foram intercalados os demais ensaios no estado fresco e ainda moldados os corpos de prova (CP) para os ensaios no estado endurecido. Para todos os ensaios foram realizados três repetições.

3.4.1 Índice de consistência por espalhamento

A quantidade de água nas argamassas foi determinada através do índice de consistência, conforme a norma ABNT NBR 13276:2005, fixado em (260 ± 5) mm na mesa de consistência de espalhamento. Os procedimentos de consistência por espalhamento e equipamentos usados, encontram-se Figura 15.

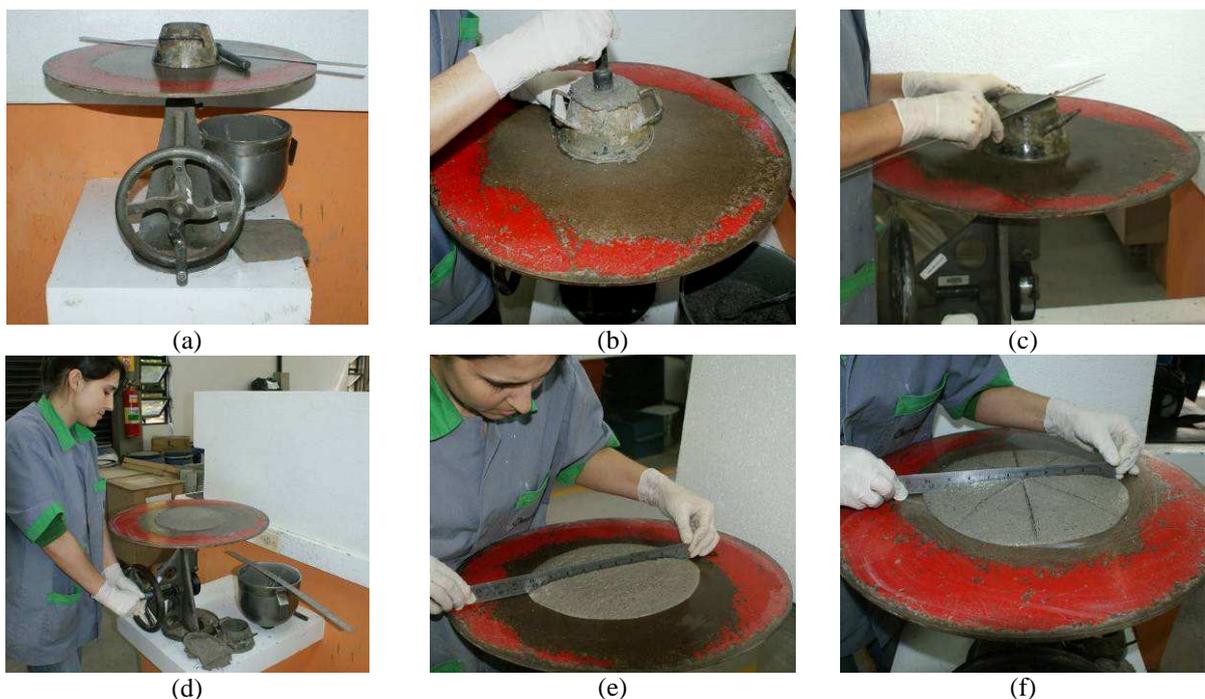


Figura 15 - Etapas do ensaio de índice de consistência por espalhamento: (a) equipamento para realização do ensaio; (b) adensamento da argamassa no molde; (c) moldagem e rasamento do cone; (d) golpes; (e) medição do índice de consistência e; (f) 3 medições para a obtenção de média do índice de consistência.

3.4.2 Consistência por penetração de cone

Outro método de ensaio que avaliou a consistência das argamassas foi a penetração de cone, preconizado pela ASTM C 780 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2011), este método foi utilizado para uma melhor análise do material no estado fresco em todas as argamassas confeccionadas. Este procedimento foi adotado para diversos autores, como Souza (2005), Cascudo e Carasek (2006) e Arnold (2011).

Emprega-se um recipiente cilíndrico, com volume de 429 cm³. Com o auxílio de colher ou espátula, o material foi colocado no recipiente em três camadas, adensando cada camada com 20 golpes de soquete (o mesmo utilizado para o ensaio de espalhamento). Em seguida a amostra foi nivelada com as bordas superiores do recipiente e realizado o acabamento da superfície de topo da argamassa, com uma régua metálica, respeitando o tempo total de preenchimento e acabamento final para executar o ensaio (8:30min).

O recipiente cilíndrico foi posicionado sob o cone, de modo que a parte inferior do cone ficasse rente à argamassa e ambos alinhados pelos seus eixos. Passados 8:30 min da adição do cimento na mistura, foi realizado o ensaio. O dispositivo cônico foi liberado em queda livre, permitindo a penetração do cone na amostra colocada abaixo. Decorridos 10 segundos da liberação da haste de penetração, procedeu-se a leitura da profundidade de penetração do cone, em milímetros. A Figura 16 mostra o ensaio de penetração de cone. Este ensaio, juntamente com o squeeze flow foi utilizado para determinar os parâmetros reológicos das argamassas.

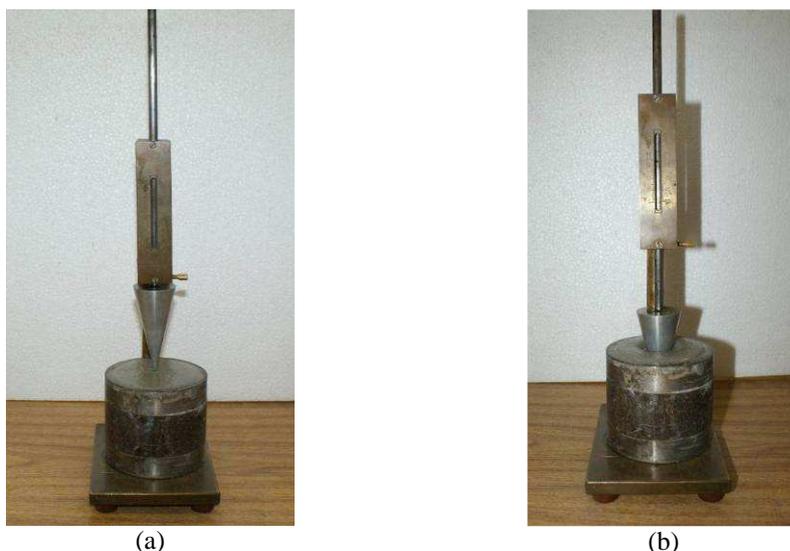


Figura 16 - Ensaio de penetração de cone: (a) equipamento utilizado para o ensaio e a argamassa devidamente preparada para a liberação do dispositivo cônico; (b) conjunto após a liberação do dispositivo cônico.

3.4.3 Squeeze flow

De acordo com Silva et al. (2005 b), o ensaio do squeeze flow é um método eficiente para analisar a reologia das argamassas. Ao comparar este ensaio com outros em seu estudo, este método determinou mais adequadamente o comportamento das argamassas no estado fresco, possuindo grande sensibilidade às variações da trabalhabilidade das argamassas. O procedimento aplicado foi realizado segundo a norma NBR 15839 (ABNT, 2010) e os estudos de Silva et al. (2005 b) e Arnold (2011).

Foi utilizada para este ensaio a velocidade de aplicação da carga de 0,1 mm/s, sendo que os ensaios foram realizados após 15 minutos do início da mistura das argamassas. A Figura 17 apresenta as etapas de moldagem e a execução do ensaio de squeeze flow.

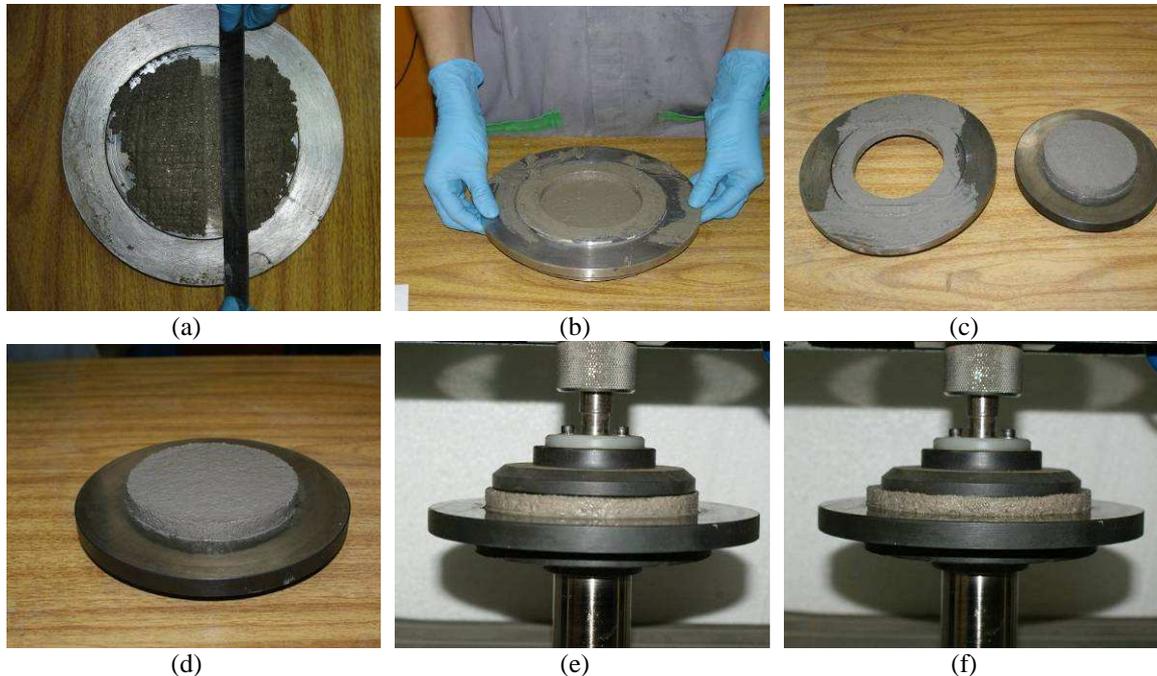


Figura 17 - Ensaio de squeeze flow: (a) após a acomodação da pasta no molde, é feito o rasamento da superfície para que esta, possa tocar perfeitamente na placa superior do equipamento de ensaio; (b) remoção do gabarito; (c) e (d) amostra sem gabarito, sobre a placa inferior do equipamento de ensaio; (e) após encaixe da placa inferior na máquina, desce a placa superior até encostar na amostra, monitorando os valores de carga, para evitar a compactação do material antes do início efetivo do ensaio; (f) ensaio realizado com aplicação de carga.

3.4.4 Retenção de água

Para o ensaio de retenção de água da argamassa, utilizou-se o método definido pela norma na ABNT NBR 13277:2005. De acordo com Costa e Mattana (2010), o ensaio permite analisar o potencial da argamassa em reter água em sua pasta quando submetida a um processo de sucção padronizado, através de uma bomba de vácuo por um determinado tempo.

Na Figura 18 são apresentados os procedimentos para ensaio de retenção de água.



Figura 18 – Procedimentos para o ensaio de retenção de água: (a) preparação da amostra através do adensamento da pasta com soquete; (b) rasamento com régua metálica.

3.4.5 Teor de ar incorporado

Para medir o teor de ar incorporado, foi utilizado o método pressométrico, especificado na norma ABNT NBR NM 47 (ABNT, 2002). O equipamento foi cedido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ensaiado no Laboratório de Material de construção - LMC da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

A Figura 19 demonstra o procedimento do ensaio pressométrico para determinação do ar incorporado.

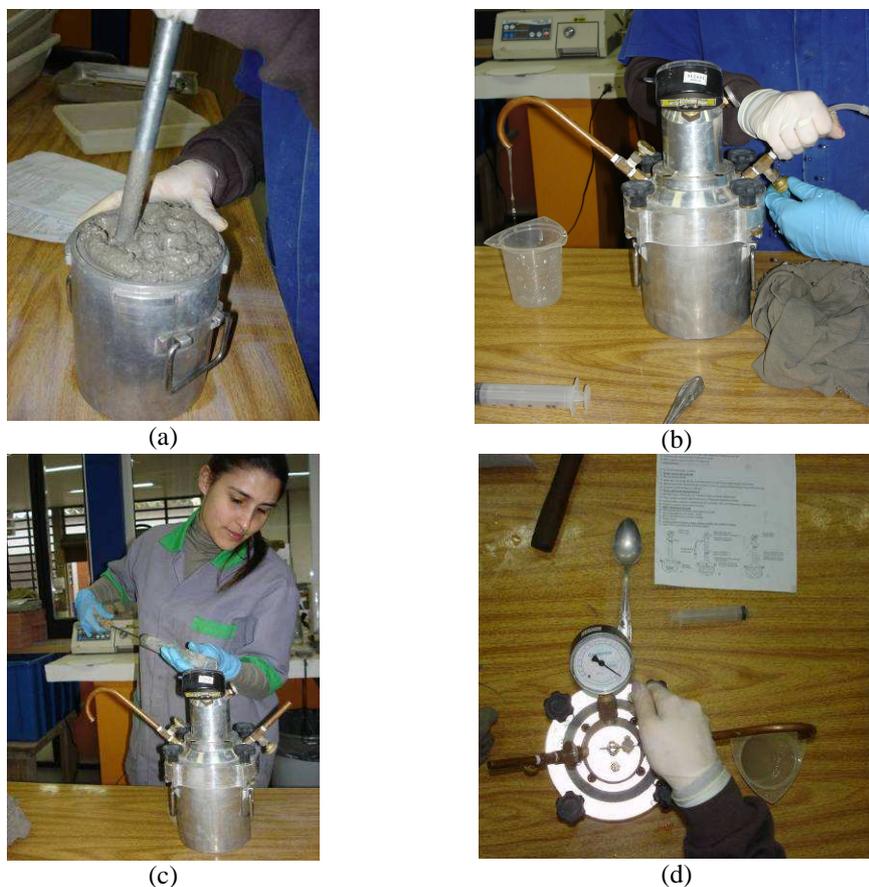


Figura 19 – Procedimentos do ensaio pressométrico: (a) adensamento da última camada com golpes distribuídos uniformemente; (b) inserção de água, através de uma das chaves na tampa até que a água

saia pela chave oposta para eliminar o ar do interior do equipamento; (c) bombeamento de ar para a câmara até que o manômetro esteja na linha de pressão inicial; (d) estabilização do manômetro na linha de pressão inicial, por expulsão de ar.

3.4.6 Densidade de massa

O experimento seguiu a norma ABNT NBR 13278: 2005. Foram realizados três ensaios para cada argamassa confeccionada, ponderando para efeito de análise, o seu valor médio amostrado.

3.5 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A Figura 20 (a) e (b) mostram as etapas de moldagem dos CP prismáticos para os ensaios de densidade de massa, resistência à tração na flexão e compressão, absorção de água por capilaridade e absorção de água, índices de vazios, massa específica. Os CP cilíndricos, Figura 20 (c) e (d), foram preparados para os ensaios de módulo de elasticidade e porosimetria por intrusão de mercúrio.

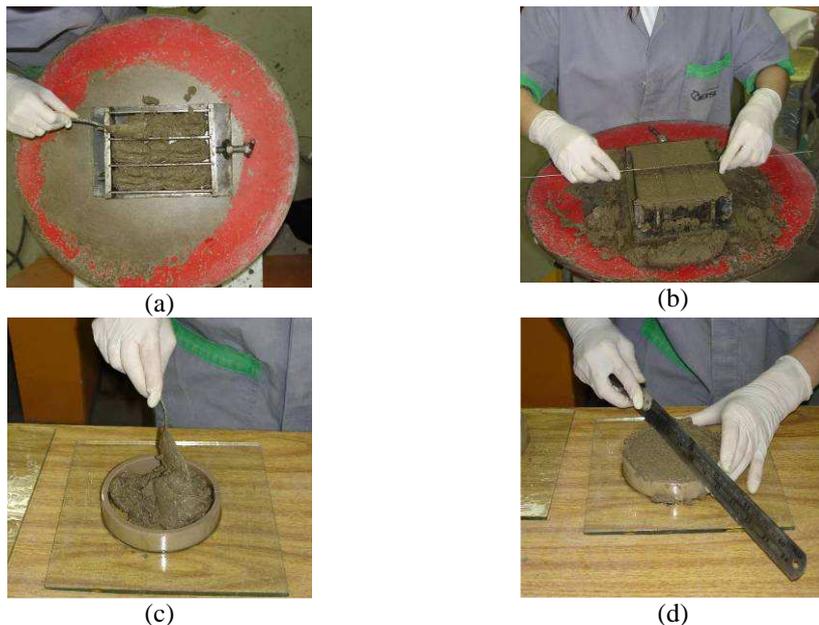


Figura 20- Moldagem dos CP prismáticos e cilíndricos: (a) e (c) preenchimento da argamassa na fôrma; (b) e (d) nivelamento da superfície.

Após a preparação e moldagem dos corpos de prova, estes foram cobertos com uma lâmina de vidro, para evitar a perda de água superficial do material, e reservados em ambiente de laboratório com umidade e temperatura controlada, de $70 \pm 10\%$ e $23 \pm 2^\circ\text{C}$ respectivamente, durante vinte e quatro horas. Transcorrido este período, foram desmoldados e mantidos na sala climatizada por vinte e oito dias, para a cura da argamassa. Após o período de cura, foram realizados ensaios pertinentes ao estado endurecido do material.

3.5.1 Densidade de massa no estado endurecido

O ensaio da densidade da massa no estado endurecido (Figura 21) foi realizado na idade de vinte e oito dias, sendo utilizados três corpos de prova (CP) de dimensão (40 x 40 x 160) mm para cada argamassa, segundo a definição da norma ABNT NBR 13280:2005.



Figura 21 - Medição do CP para o ensaio de densidade de massa.

3.5.2 Resistência à tração na flexão

Os ensaios foram realizados em uma prensa de classe 1 com capacidade de 5t aos vinte e oito dias após moldados e seguiram as especificações estabelecidas pela norma ABNT NBR 13279:2005. Para cada tipo de areia foram realizados três ensaios com corpos de prova de dimensão de (40 x 40 x 160) mm, em uma prensa com velocidade de carregamento de (50 ± 10) N/s.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado na idade de vinte e oito dias, com apoio em 3 pontos, segundo especificado no anexo A figura A.4 da norma ABNT NBR 13279:2005, sendo mostrado na Figura 22 apresenta o ensaio de resistência à tração na flexão.

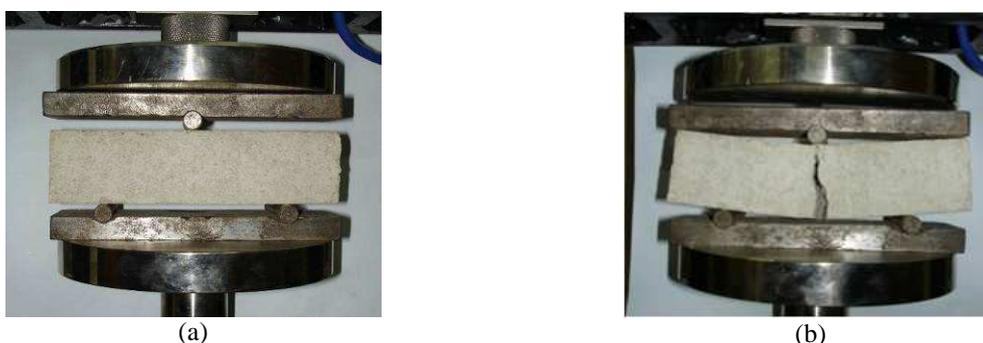


Figura 22 - (a) corpo de prova antes da realização do ensaio de aplicação da carga; (b) corpo de prova posterior ao ensaio.

A partir dos dados gerados nos ensaios, usou-se a Equação 3 para obter a resistência à tração na flexão.

$$R_f = 1,5 \times \frac{F_f \times L}{40^3}$$

Equação 3

Onde:

R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os pontos de apoio (mm);

3.5.3 Resistência à compressão

Para o ensaio de compressão, foram utilizados os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 13279:2005. Foram submetidos ao ensaio com idade de vinte e oito dias, seis corpos de prova para cada tipo de argamassa, obtidos a partir do ensaio de resistência à tração na flexão, conforme Figura 23. A velocidade de carregamento aplicada foi de 500 ± 50 N/s. A Figura 24 o ensaio de resistência à compressão.

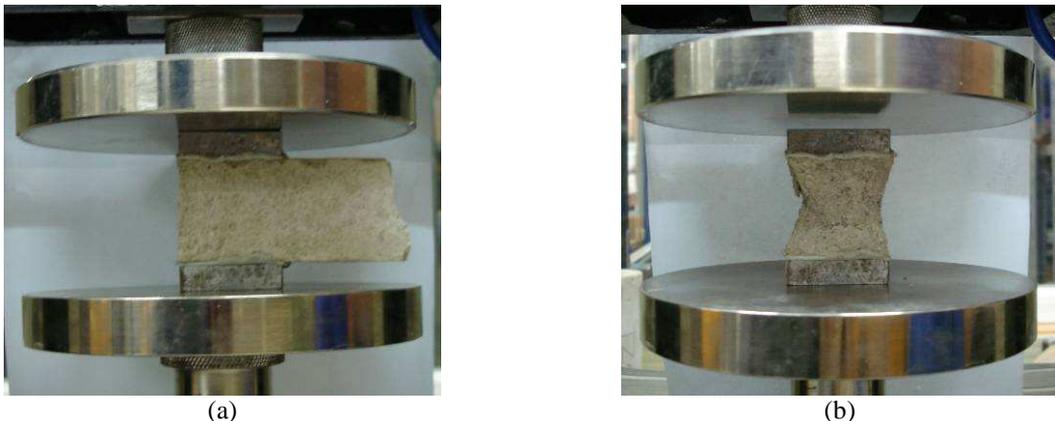


Figura 23 - Corpo de prova antes (a) e após o ensaio de resistência à compressão (b).

A partir dos dados gerados nos ensaios, usou-se a Equação 4 para obter a resistência à compressão.

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

Equação 4

Onde:

R_c = resistência à compressão (MPa);

F_c = carga máxima aplicada no prisma (N);

A = área da seção comprimida (1600 mm^2 para este ensaio).

3.5.4 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A absorção de água e o coeficiente de capilaridade das argamassas foram caracterizados conforme método da norma ABNT NBR 15259:2005. Para cada tipo de argamassa, foram ensaiados três corpos de prova com dimensões de (40 x 40 x 160) mm, aos

vinte e oito dias de idade. Na Figura 24 é mostrado o ensaio de absorção de água por capilaridade.



Figura 24 - Absorção de água por capilaridade de argamassas.

3.5.5 Absorção de água por imersão, índices de vazios e massa específica

A absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram realizados com idade de vinte e oito dias, de acordo com as especificações da norma ABNT NBR 9778:2009. A Figura 25 mostra os três corpos de prova de argamassa sendo ensaiados.



Figura 25 - Absorção de água por imersão.

3.5.6 Módulo de Elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado com o equipamento "Pundit" (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester), utilizado segundo as especificações da norma ABNT NBR 8802:1994. Para o experimento, foram empregados três corpos de prova cilíndricos, com dimensão de 10 cm de diâmetro para cada tipo de argamassa. A Figura 26 apresenta o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, onde (a) mostra a

calibração do equipamento; (b) mostra o dispositivo utilizado para acoplar o corpo de prova e (c) mostra a execução do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.

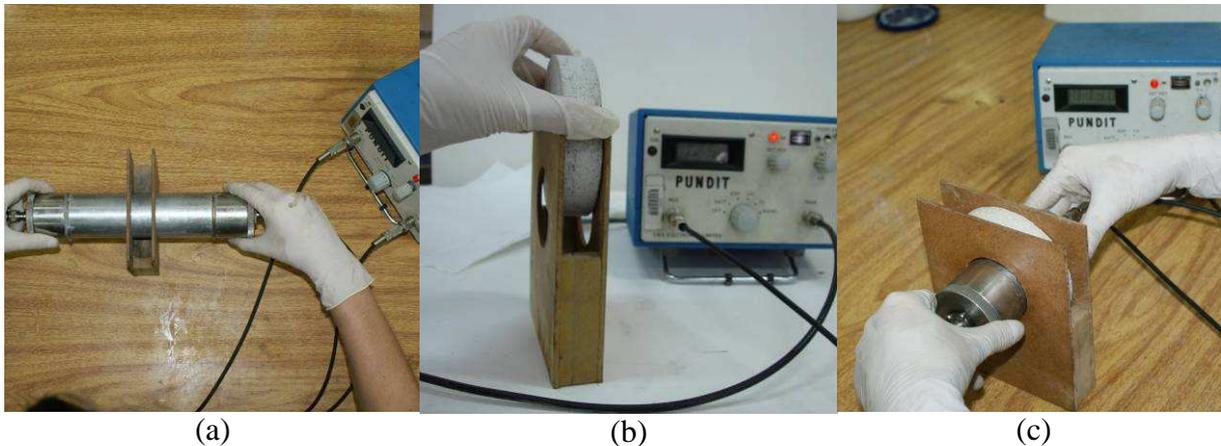


Figura 26 - Módulo de elasticidade dinâmico: (a) calibração; (b) porta-amostra e amostra; (c) execução do ensaio.

O ensaio visa determinar a velocidade em que a onda ultra-sônica percorre o corpo de prova, utilizando-se o equipamento “PUNDIT” (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) (ARNOLD, 2011). A velocidade da onda ultra-sônica foi obtida através da Equação 5.

$$v = \frac{d}{t} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

v = velocidade da onda ultra-sônica (km/s);

d = altura do corpo de prova (km);

t = tempo (segundos) que a onda ultra-sônica percorre a distância d, obtido através do equipamento “PUNDIT”.

O módulo de elasticidade (E_d) é dado pela Equação 6, de acordo com a norma BS -1881 Part 203/1986.

$$E_d = \gamma \times v^2 \times \frac{(1 + \nu) \times (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

γ = densidade de massa no estado endurecido (kg/m³);

v = velocidade da onda ultra-sônica;

ν = Coeficiente de Poisson

A velocidade da onda ultra sônica é a velocidade com que a onda ultra-sônica percorre o corpo de prova no sentido longitudinal e o Coeficiente de Poisson é a razão entre a deformação transversal e a deformação longitudinal, quando um corpo de prova é submetido a

uma carga de compressão axial (CALLISTER, 2002). Para as argamassas, o coeficiente varia de 0,10 a 0,20, sendo diretamente proporcional à capacidade de deformação da argamassa, segundo Carneiro (2001).

3.5.7 Determinação da distribuição de poros - porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados a partir de 1 amostra retirada de cada tipo de argamassa dos corpos de prova produzidos para os ensaios de módulos de elasticidade dinâmicos, os quais foram mantidos durante todo o seu período de cura dentro da sala climatizada. As idades das amostras eram de 101 dias para os corpos de prova com agregados reciclados e 102 dias de idade para o corpo de prova com AN.

A Figura 27 ilustra a posição onde foi removido o material para o ensaio. Inicialmente foi removido uma faixa retangular do cilindro e posterior o meio desta com dimensões de aproximadamente (8x8x10) mm, de modo a entrar no porta amostra.



Figura 27 - Posição da amostragem para o ensaio de determinação da distribuição de poros.

3.6 QUADRO QUANTITATIVO DE ENSAIOS REALIZADOS

A Tabela 11 apresenta os ensaios realizados neste estudo e o quantitativo de corpos de prova utilizado para cada ensaio.

Tabela 11 - Ensaio realizados e quantitativo de corpos de prova.

Condição da argamassa	Ensaio	Quantidade de corpos de prova	Tipos de argamassa	Total de corpos de prova ensaiados
Estado fresco	Índice de consistência	9	3	27
	Squeeze Flow	3	3	9
	Densidade de massa	9	3	27
	Retenção de água	1	3	3
	Penetração de cone	9	3	27
	Teor de ar incorporado	3	3	9
Estado endurecido	Densidade de massa	3	3	9
	Resistência à tração na flexão	3	3	9
	Resistência à compressão	6	3	18
	Módulo de elasticidade dinâmico	3	3	9
	Absorção de água total	3	3	9
	Índice de vazios	3	3	9
	Massa específica	3	3	9
	Absorção de água por capilaridade	3	3	9
	Porosimetria por Intrusão de mercúrio	1	3	3
	Total de corpos de prova			

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na análise da forma dos grãos dos agregados e dos ensaios das argamassas no estado fresco e endurecido. Os resultados são amostrados em forma de gráfico e tabelas, sempre que possível, a partir das médias dos valores obtidos.

4.1 FORMA DOS GRÃOS

A partir de análise de imagem foram calculados parâmetros relacionados com a forma dos agregados das diferentes frações granulométricas das areias. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 12 e na Tabela 13.

Tabela 12 - Média das áreas e perímetros das projeções dos grãos.

Fração (mm)	Área (mm ²)			Perímetro (mm)		
	AN ⁽¹⁾	ARCC	ARCT	AN ⁽¹⁾	ARCC	ARCT
1,2	7,7920	6,4787	8,1973	11,956	11,249	12,772
0,6	1,9404	1,9663	1,7796	5,7299	6,2830	5,5335
0,3	0,5418	0,4425	0,4740	2,9120	2,6714	2,7626
0,15	0,1314	0,1133	0,1044	1,3172	1,2868	1,2221
0,075	0,0448	0,0285	0,0471	0,7626	0,6187	0,7921

¹Fonte: Arnold (2011)

Tabela 13 - Média das dimensões máximas das projeções dos grãos

Fração (mm)	Dimensão máxima (mm)		
	AN ⁽¹⁾	ARCC	ARCT
1,2	3,8139	3,5430	3,9660
0,6	1,8321	1,9420	1,9438
0,3	0,9553	0,9468	0,9505
0,15	0,2496	0,4549	0,4343
0,075	0,2481	0,2223	0,2761

¹Fonte: Arnold (2011)

Ao analisar a AN com o ARCC observa-se que praticamente todas as frações dos ARCC apresentaram área e perímetro menor do que a AN, com exceção da fração de abertura de 0,6mm. O agregado ARCT apresenta, em média, área e perímetro superiores à do ARCC, aproximando-se dos valores da AN.

Verifica-se na Tabela 14 a existência de grãos com dimensões máximas maiores do que a abertura da malha utilizada no peneiramento de cada fração granulométrica, tanto para a areia de referência, quanto para as areias recicladas. Arnold (2011), explica que a dimensão máxima das projeções dos grãos pode ser maior do que as aberturas das malhas das peneiras superiores das frações, devido à passagem de grãos lamelares (de forma alongada) que acumulam-se nas peneiras inferiores. Percebe-se que o método de peneiramento não é

adequado para determinar a real distribuição granulométrica dos agregados analisados. Estes resultados estão coerentes com os resultados de Tristão (2005) e Arnold (2011).

O grau de arredondamento e a esfericidade dos agregados miúdos estudados foram realizados através da análise qualitativa (visual) e quantitativa. A análise visual é estudada através da comparação dos 400 grãos analisados em cada peneira de cada areia, fotografias visualizadas na Figura 28, na Figura 29 e na Figura 30 com os padrões gráficos de grau de esfericidade e arredondamento da Figura 4.

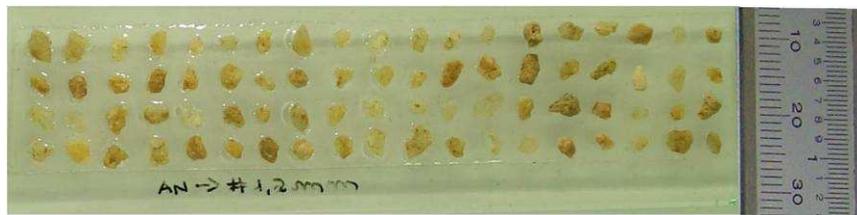


Figura 28 - Amostra dos grãos da AN, retida na peneira de abertura 1,2mm.



Figura 29 - Amostra dos grãos do ARCC, retida na peneira de abertura 1,2mm.



Figura 30 - Amostra dos grãos do ARCT, retida na peneira de abertura 1,2mm.

Na análise qualitativa dos grãos estudados, apresentada na Tabela 14, os dados da AN baseiam-se nos estudos de Arnold (2011), onde esta é classificada qualitativamente como subarredondada com alto grau de esfericidade em sua maior porcentagem. Na avaliação visual do ARCC e do ARCT comparando com os padrões gráficos, conclui-se que ambas apresentam semelhanças em suas partículas, apresentando grãos subangulosos e subarredondados com baixo grau de esfericidade.

Observa-se que os grãos de ARCC e ARCT possuem superfície mais rugosa do que a AN, ou seja, tendem a apresentar pior trabalhabilidade e prejudicando possivelmente a estética do acabamento.

Tabela 14 - Análise qualitativa dos grãos dos agregados miúdos.

Agregado miúdo	Padrões Gráficos							
	Grau de arredondamento Angularo (%)		Grau de arredondamento Subangularo (%)		Grau de arredondamento Subarredondado (%)		Grau de arredondamento Arredondado (%)	
AN ⁽¹⁾	0		15		80		5	
ARCC	2		50		48		0	
ARCT	2		50		48		0	

	Grau de esfericidade		Grau de esfericidade		Grau de esfericidade		Grau de esfericidade	
	Alto (%)	Baixo (%)						
AN ⁽¹⁾	0	0	10	5	55	25	0	5
ARCC	0	2	4	46	13	35	0	0
ARCT	0	2	3	47	11	37	0	0

¹Fonte: Arnold (2011)

O arredondamento foi calculado a partir da Equação 1, através das imagens dos grãos, estando os resultados na Tabela 15.

Tabela 15 – Arredondamento dos agregados.

Fração (mm)	Arredondamento		
	AN ⁽¹⁾	ARCC	ARCT
1,2	0,6715	0,6574	0,6438
0,6	0,7286	0,6641	0,6000
0,3	0,7539	0,6288	0,6683
0,15	0,7798	0,6976	0,7054
0,075	0,7008	0,7342	0,7864

¹Fonte: Arnold (2011)

A AN comparando com o ARCC e ARCT, apresentou o maior arredondamento em praticamente todas as frações dos grãos, com exceção da fração 0,075mm em que os agregados reciclados apresentaram o maior arredondamento, podendo ter ocorrido uma distorção nos resultados desta fração, possivelmente em função da dificuldade ocorrida na medição dos grãos de tamanhos muito pequenos.

Ao comparar o ARCC com o ARCT, percebe-se que as peneiras 1,2mm e 0,6mm dos agregados provenientes de cura convencional, apresentaram os maiores arredondamentos. Porém nas demais frações, 0,3mm, 0,15mm e 0,15mm ocorreram uma inversão nos resultados, onde os agregados provenientes de cura térmica mostraram maiores arredondamentos.

Na Figura 31 tem-se a variação do arredondamento com o tipo de agregado e a fração, podendo analisar a diferença entre cada tipo de areia e sua respectiva fração.

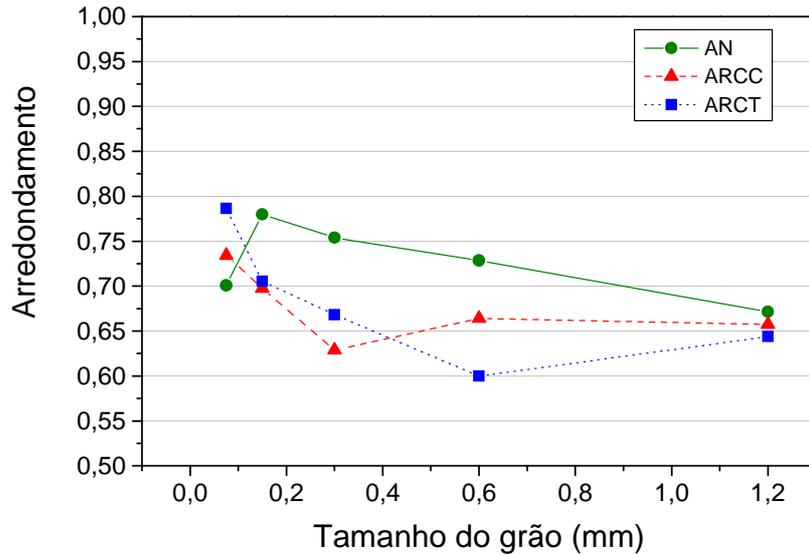


Figura 31 - Variação do arredondamento dos grãos das frações das areias.

A areia de referência apresentou um melhor arredondamento quando comparada com as areias recicladas provenientes de concreto, com exceção da fração 0,075mm. O ARCC e ARCT apresentaram arredondamento similar.

Os resultados para a análise de esfericidade dos agregados são apresentados na Tabela 16, a partir da Equação 1.

Tabela 16 - Esfericidade dos agregados.

Fração (mm)	Esfericidade		
	AN ⁽¹⁾	ARCC	ARCT
1,2	0,6797	0,6430	0,6311
0,6	0,7430	0,6256	0,7300
0,3	0,7958	0,7787	0,7801
0,15	0,8225	0,8596	0,8781
0,075	0,7762	0,9347	0,9421

¹Fonte: Arnold (2011)

Verifica-se que a areia de referência possui maior esfericidade nas frações maiores 1,2mm, 0,6mm e 0,3mm, quando comparada com os agregados reciclados. Porém nas demais frações ocorre uma inversão dos resultados, onde os ARCT seguidos dos ARCC apresentaram os maiores valores de esfericidade. Esta inversão dos resultados pode ter ocorrido pela dificuldade em medir estes grãos pequenos. A Figura 33 apresenta o gráfico com os resultados de esfericidade.

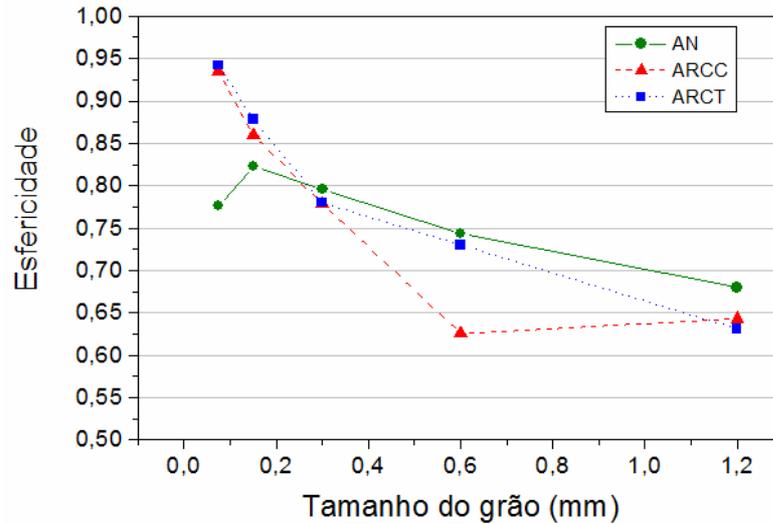


Figura 32 - Variação da esfericidade dos grãos das frações das areias.

Percebe-se que a areia de referência apresenta grãos mais circulares. Os agregados provenientes de cura convencional são os de menor esfericidade.

Segundo Arnold (2011), a influência da forma das areias no empacotamento das partículas é marcante. O autor destaca que existe uma grande diferença entre o arredondamento e a esfericidade das areias, quando se altera a origem e o processo de obtenção das mesmas.

A distribuição granulométrica das areias influencia no volume de vazios e conseqüentemente, na proporção de mistura das argamassas, porém a forma dos grãos que compõem a areia desempenha maior influência, uma vez que diferentes composições granulométricas geram diferentes índices de vazios das areias. Portanto, areias de diferentes origens e processamentos, com a mesma distribuição granulométrica em massa, terão diferentes índices de vazios e em geral, quanto maior o arredondamento e a esfericidade dos grãos, menores os índices de vazios das areias (TRISTÃO, 2005).

Castro e Pandolfelli (2009) mencionam que a morfologia das partículas pode alterar a condição de empacotamento. Quanto menos esférica for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, pois verifica-se o atrito entre as partículas a partir do contato de suas superfícies irregulares. Quanto menor for o tamanho dos grãos irregulares, maior será esse efeito, devido à maior área superficial específica.

4.2 DETERMINAÇÃO DA REATIVIDADE DOS ARC – MONITORAMENTO DA TEMPERATURA SEMI-ADIABÁTICA

O ensaio de monitoramento da evolução da temperatura parece indicar a existência de cimento anidro presente nos ARC, conforme mostra o Gráfico da Figura 33.

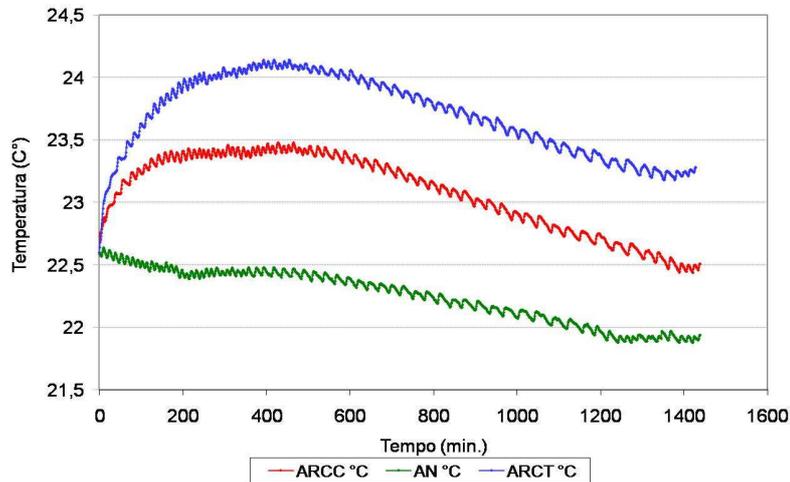


Figura 33 - Monitoramento da evolução da temperatura dos agregados em contato com água.

Percebe-se que há um acréscimo na temperatura para os agregados reciclados até aproximadamente 430 minutos após a colocação das amostras no equipamento, após a este período tem-se uma queda na temperatura. Em contrapartida os agregados naturais não possuem elevação da temperatura ao longo do tempo. Conclui-se que nos agregados reciclados há uma parcela de cimento anidro, que irá interferir nas propriedades das argamassas onde são usados estes agregados.

4.3 RESUMO DOS ENSAIOS EM ARGAMASSAS

A Tabela 17 e a Tabela 18 apresentam um resumo dos resultados dos ensaios realizado nesta pesquisa. São relatados os valores médios obtidos em ensaios no estado fresco e no estado endurecido, para na idade de 28 dias.

Tabela 17 - Resumo dos resultados no estado fresco.

Argamassas	AN	ARCC	ARCT
Teor de água (%)	18	24	25
IC (mm)	262 (2,03)	258 (1,66)	262 (1,53)
Penetração de cone (mm)	52,66 (1,76)	62,42 (3,98)	44,26 (2,99)
Retenção de água (%)	98 (0,58)	97 (0,58)	96 (0,58)
Densidade de massa (kg/m ³)	2066 (0,01)	1558 (0,02)	1845 (0,01)
Ar incorporado (%)	1,38 (0,03)	5,95 (0,05)	2,67 (0,12)

() Indica o desvio padrão obtido no ensaio.

Tabela 18- Resumo dos resultados no estado endurecido.

Argamassas	AN	ARCC	ARCT
Densidade de massa (kg/m ³)	1832 (11,59)	1380 (6,20)	1631 (14,47)
Resistência à tração na flexão (MPa)	1,03 (0,06)	0,8 (0,07)	1,24 (0,05)
Resistência à compressão (MPa)	2,56 (0,32)	0,93 (0,19)	2,2 (0,37)
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	At (10min) 0,611 (0,01) At (90min) 1,696 (0,01)	0,526 (0,01) 1,314 (0,01)	0,619 (0,02) 1,62 (0,07)
Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	17,37 (0,35)	12,62 (0,13)	16,02 (0,82)
Absorção de água por imersão (%)	14,99 (0,19)	32,2 (0,80)	22,71 (0,23)
Índice de vazios (%)	27,76 (0,28)	43,95 (0,75)	35,85 (0,18)
Massa específica real (kg/m ³)	2,56 (0,004)	2,44 (0,02)	2,46 (0,02)
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	3,717 (276,35)	2,705 (160,71)	4,861 (225,65)

() Indica o desvio padrão obtido no ensaio.

4.4 ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.4.1 Teor de água e Índice de consistência das argamassas

Neste estudo, tanto as argamassas produzidas com AN, quanto às argamassas com incorporação de ARCC e ARCT foram confeccionadas na consistência de 260 ± 5 mm, especificada pela norma ABNT NBR 13276:2005.

Para atingir o índice de consistência fixado pela norma ABNT NBR 13276:2005, de 260 ± 5 mm, verificou-se a necessidade de adicionar maiores teores de água para os agregados reciclados de concreto (ARC) quando comparados a areia natural (AN).

As argamassas com incorporação de ARCC e ARCT exigiram praticamente o mesmo teor de água, de 24% e 25% respectivamente, sendo ambos superiores ao da AN, com teor de água de 18%.

Este resultado é coerente com Pedrozo (2008), Vegas et al. (2009) e Neno (2010), que observaram que a incorporação de agregado reciclado em argamassas aumenta a exigência de água para a consistência ideal. Segundo os autores citados, o fenômeno é explicado pela maior absorção de água que os grãos reciclados demandam frente à AN.

Observa-se que a absorção dos ARC foi superior à do agregado natural, conforme citado no Item 3.2.2 (f). Neno (2010) atribui esta maior absorção à porosidade dos ARC ser mais elevada que a da AN, tendo como consequência, maior capacidade de absorção de água e Grubba (2009), acredita que essa diferença deve-se à presença de argamassa aderida aos grãos, uma vez que a porosidade de argamassas é bem superior a verificada em materiais pétreos.

Outra razão para que os agregados reciclados utilizados na produção das argamassas tenham influenciado na consistência da mesma, é a possível existência de cimento

anidro na sua composição. Ressalta-se que os ARCC e ARCT foram utilizados no seu estado natural (sem lavagem após o processo de moagem).

Outra explicação que pode justificar estes resultados se deve à forma dos grãos, que nas areias naturais é mais arredondada, e por isso "deslizam" melhor que os agregados reciclados, não precisando assim, de tanta água para o espalhamento padrão na mesa de consistência (TRISTÃO, 2005).

Comparando a argamassa com a incorporação de ARCC com a ARCT verificou-se que na última foi necessário adicionar uma pequena quantidade de água em relação à primeira. Uma das hipóteses que pode explicar este resultado é em função das diferenças de composição do agregado.

4.4.2 Comportamento reológico das argamassas

Além do ensaio de mesa de consistência, também foram realizados os ensaios de penetração de cone e squeeze flow.

4.4.2.1 Penetração de cone

Figura 34 é possível visualizar os resultados do ensaio de penetração de cone.

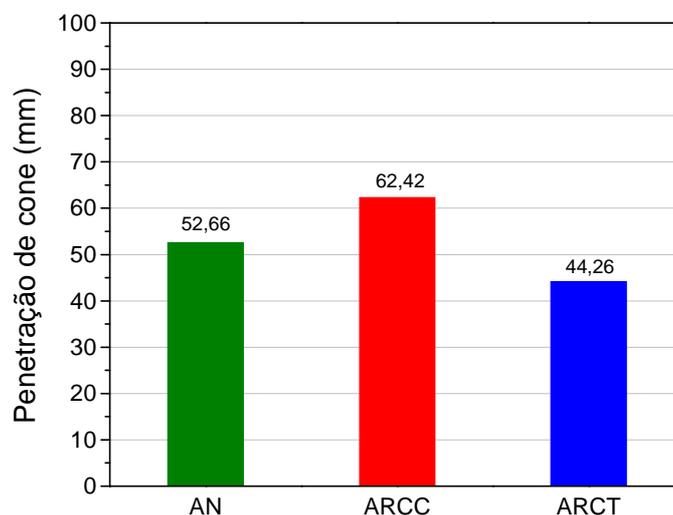


Figura 34 – Penetração de cone em função do tipo de agregado.

Observa-se que os resultados de penetração de cone foram diferentes nas três argamassas em estudo. O ARCC (62,42 mm) apresenta a maior média de profundidade na penetração do cone quando comparada a AN (52,66 mm). Apesar de terem apresentado um índice de consistência muito semelhante entre si, com uma diferença de 4 mm, esta variação de penetração ocorre porque o fenômeno preponderante na penetração, segundo Bauer

(2005), é a tensão de cisalhamento da argamassa. Esta tensão, possivelmente seja fortemente influenciada pelas características morfológicas do grão, o teor de água e a quantidade de ar incorporado na argamassa. Em contrapartida, ao comparar a média dos ensaios de penetração de cone da AN (52,66 mm) com os ARCT (44,26 mm) percebe-se que ocorre o inverso aos resultados encontrados com os ARCC (62,42 mm), isto é: a argamassa com ARCT apresenta menor profundidade na penetração (44,26 mm), o que implica em menor trabalhabilidade e maior tensão de cisalhamento.

Ao comparar a penetração de cone da argamassa de referência com ARCC, é provável que as características morfológicas dos grãos tenham influenciado mais que a quantidade de água acrescentada (maior que a AN) e o aumento no ar incorporado resultou em um acréscimo de trabalhabilidade.

Com base nos estudos de Souza (2005), Cascudo et al. (2005) e Cascudo e Carasek (2006), a faixa de consistência representativas de argamassas trabalháveis compõe os valores entre 45mm a 55 mm. Com relação às médias obtidas nos ensaios de penetração de cone, tanto a argamassa com AN, quanto as argamassa com ARCT, encontram-se em uma zona de possível aplicação. Já as argamassas com ARCC se encontram numa faixa de consistência trabalhável, mas passível de problemas na sua aplicação.

4.4.2.2 *Squeeze flow*

O comportamento reológico de argamassas de revestimento foi avaliado pelo método do squeeze-flow. Os resultados de viscosidade das argamassas com AN, ARCC e ARCT são apresentados no Gráfico da Figura 35.

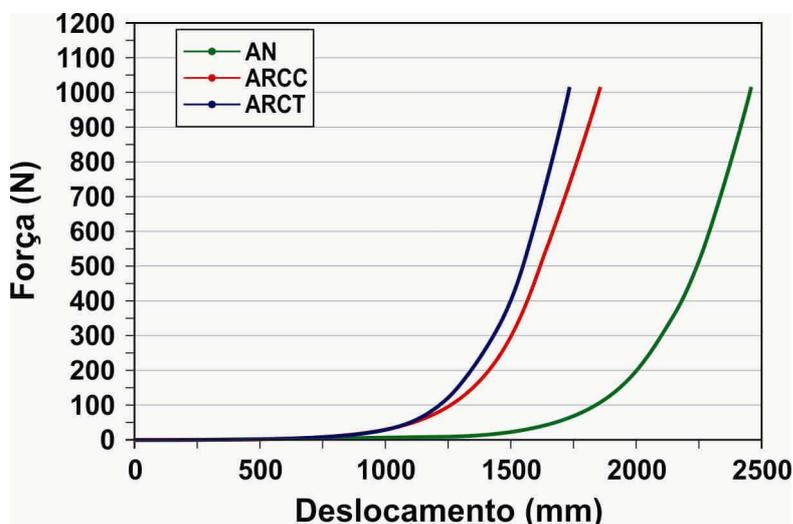


Figura 35 - Ensaio de squeeze flow nas argamassas.

A curva da argamassa com AN apresentada neste ensaio (Figura 36), resultou em um maior deslocamento em relação às curvas das argamassas com ARC. Para uma força de 1000N a AN apresentou 2455 μm de deslocamento, enquanto que o ARCC e ARCT apresentaram 1854 μm e 1728 μm de deslocamento, respectivamente.

É possível afirmar, os agregados naturais geram uma mistura com menor viscosidade apesar desse valor não ter sido calculado e de maior facilidade de espalhamento, já as argamassas com ARCT, e ARCC (com deslocamentos similares entre si), geram uma maior viscosidade da mistura, apresentando, segundo estudos de Arnold (2011), trabalhabilidade inadequada para a aplicação de revestimentos.

A argamassa com AN possui um atrito superficial menor que os ARC e uma coesão maior, favorecendo assim a mobilidade da argamassa quando uma tensão de deformação for aplicada. Em concordância, Silva et al. (2005 b) apontam que a facilidade de espalhamento de uma argamassa está relacionada com a movimentação e de atrito superficial menor existentes entre as partículas.

Segundo Freitas (2010), as argamassas com baixas cargas, provavelmente são de fácil espalhamento, porém podem ser excessivamente fluidas, apresentando baixa viscosidade, tal que não seja possível a aplicação de camadas espessas ou que a aplicação não possa ser imediata após o preparo. Já as argamassas com cargas intermediárias, como é o caso da argamassa com AN, tendem a permitir uma maior produtividade, principalmente àquelas que não apresentam indícios do terceiro estágio. Em contrapartida, as argamassas anteriores, as argamassas que necessitam de cargas muito maiores para serem deformados, possivelmente são de difícil aplicação resultando em baixa produtividade.

Conforme Arnold (2011), em um estudo onde os resultados do squeeze flow foram confrontados com a opinião de um profissional durante a aplicação da argamassa na forma de revestimento de diversos substratos de cerâmica vermelha, o deslocamento abaixo de 1700 μm corresponde a uma argamassa com trabalhabilidade inadequada para aplicação de revestimento. Utilizando estas referências, nas argamassas com ARC muito provavelmente a trabalhabilidade deverá ser ajustada com água ou aditivo, para permitir sua aplicação. Porém, com estes procedimentos ainda persiste a dúvida se a coesão será adequada.

Segundo Cardoso et al. (2005), a faixa de deformação e a intensidade dos estágios podem alterar de acordo com a composição dos materiais, teor de água, tamanho das

partículas, presença de aditivos, e também, com a configuração de ensaio utilizado, entre outros.

No caso específico, a diferença de comportamento entre as argamassas pode ser justificada pela diferença de morfologia (área superficial e microrugosidade) dos grãos de agregados e pela quantidade de água que foi adicionada em cada argamassa.

A forma dos grãos influencia no comportamento reológico das argamassas e no empacotamento das mesmas (grãos mais arredondados e esféricos tendem a se movimentar com maior facilidade que os grãos lamelares). Ao se comparar a argamassa de referência com as demais, é possível dizer que a viscosidade é menor nas argamassas com agregados de forma mais esférica, tais como a AN. Já nos agregados reciclados, que possuem formas mais lamelares, a viscosidade é maior, gerando menor trabalhabilidade. Isto ocorre devido aos grãos serem mais angulosos e menos esféricos, o que piora o empacotamento entre os grãos do agregado miúdo. No caso da argamassa com ARCC, apesar deste agregado possuir a pior forma, apresentou uma viscosidade menor do que a mistura com ARCT. Possivelmente a explicação para este fato seja em função da maior incorporação de ar devido a sua forma mais lamelar.

O teor de água das misturas, em geral exerce influência na trabalhabilidade da argamassa. A maior quantidade de água gera uma camada de água mais espessa entre os grãos, aumentando sua trabalhabilidade. Ao se comparar a argamassas com AN com as argamassas com ARC, entretando, o comportamento é inverso ao esperado. O aumento do teor de água nas argamassas com agregado reciclado, provavelmente aumenta a consistência, porém diminui a coesão da mistura, fazendo com que o estágio II inicial de comportamento plástico, seja menor do que a argamassa com areia natural.

Outra possível justificativa para o comportamento observado está no teor de ar incorporado que apresentou 1,38% na mistura de referência, 5,95% na argamassa com ARCC e 2,67% na argamassa com ARCT. A maior incorporação de ar favorece para distanciar mais um grão do outro, afastando assim as partículas e melhorando a movimentação dos grãos na mistura, mostrando uma pequena influência, apresentando assim um atrito superficial menor e uma menor viscosidade da argamassa.

Ao se comparar o ensaio de squeeze flow com o índice de consistência, percebe-se que o primeiro ensaio possui maior sensibilidade que o segundo. As argamassas com índices de consistência similares (dentro da faixa de + 5 mm), possuem um comportamento

diferente no ensaio de squeeze flow, com uma variação expressiva no deslocamento das misturas quando aplicado uma mesma força.

Esta constatação também foi apontada por Cardoso et al. (2005 b), ao verificar que o ensaio de squeeze-flow mostrou ser bastante sensível e versátil para a avaliação reológica de argamassas, em relação aos métodos tradicionais como a mesa de consistência, sendo capaz de detectar pequenas alterações nas características reológicas das mesmas, fornecendo um perfil de comportamento de acordo com as solicitações impostas, ao contrário de outros ensaios tradicionais que fornecem o valor medido. Em conformidade, Arnold (2011) verifica que o ensaio de squeeze flow é mais sensível e fornece melhores resultados em comparação ao ensaio de índice de consistência.

Observa-se, comparando-se as argamassas com AN e com ARCT, que a incorporação de agregados reciclados tende a diminuir a consistência da mistura, uma vez que a forma dos grãos altera a tensão de escoamento da argamassa, fazendo com que a AN, de grãos mais arredondados e esféricos, tenha uma maior deformação, no ensaio de squeeze flow, e um maior deslocamento do cone, no ensaio de penetração de cone.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de squeeze flow e penetração de cone, constata-se uma discrepância nos resultados da argamassa com ARCC em relação a argamassa com ARCT, onde esperava-se uma analogia de comportamento na consistência das argamassas composta de resíduo de concreto, pois ambos os agregados possuem características físicas muito semelhantes, tais como: distribuição granulométrica, massa específica, massa unitária e conteúdo de espaços vazios.

Ao se analisar a argamassa com ARCC e com ARCT observa-se que a diferença de trabalhabilidade entre as misturas é pequena, ao contrário do constatado na penetração de cone. Isto porque o ensaio de squeeze flow mede a viscosidade e o ensaio de penetração de cone é proporcional à tensão de cisalhamento da argamassa. No ensaio de penetração de cone a argamassa com ARCC demonstrou ser mais trabalhável do que a argamassa com ARCT. Entretanto, a trabalhabilidade foi semelhante para ambas no squeeze flow. O teor de ar incorporado nestas argamassas deve ter diminuído fortemente a tensão de cisalhamento, resultando em diferenças entre as argamassas.

4.4.3 Retenção de água

Os resultados dos ensaios de retenção de água para cada tipo de argamassa são apresentados no Gráfico da Figura 36.

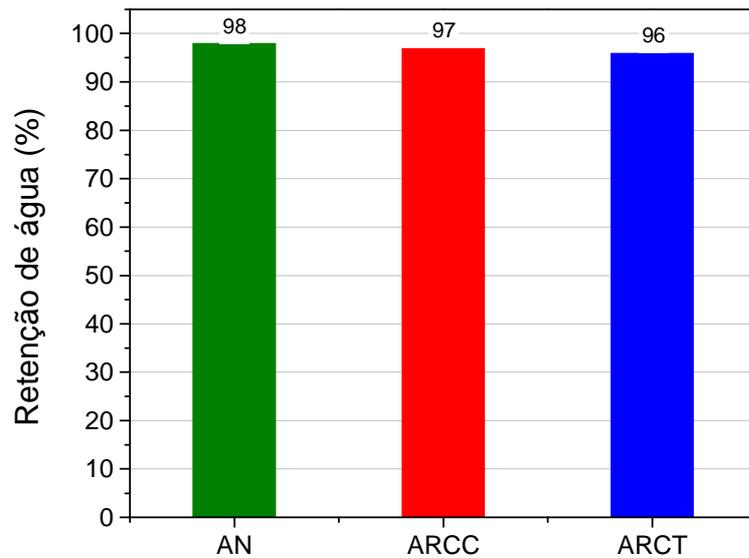


Figura 36 - Retenção de água das argamassas com AN, ARCC e ARCT.

Tendo em vista os resultados apresentados, as retenções de água nas três argamassas com diferentes agregados são bastante semelhantes entre si. Os valores são elevados e se enquadram na classe U6 da ABNT NBR 13277:2005, que corresponde a argamassa com maior retenção de água.

Embora as três argamassas apresentem valores de retenção de água similares, a argamassa com AN demonstrou maior retenção de água, com 98% em sua mistura, seguida dos ARCC com 97%; já a argamassa com ARCT, apresentou menor retenção de água, com 96%. Estes resultados são inversamente proporcionais aos teores de água que foram utilizados para o processo de amassamento das argamassas, onde a AN seguida dos ARCC e ARCT utilizaram 18%, 24% e 25% de teor de água, respectivamente. A Figura 37 apresenta a relação entre retenção de água e o teor de água que foi utilizado para cada argamassa.

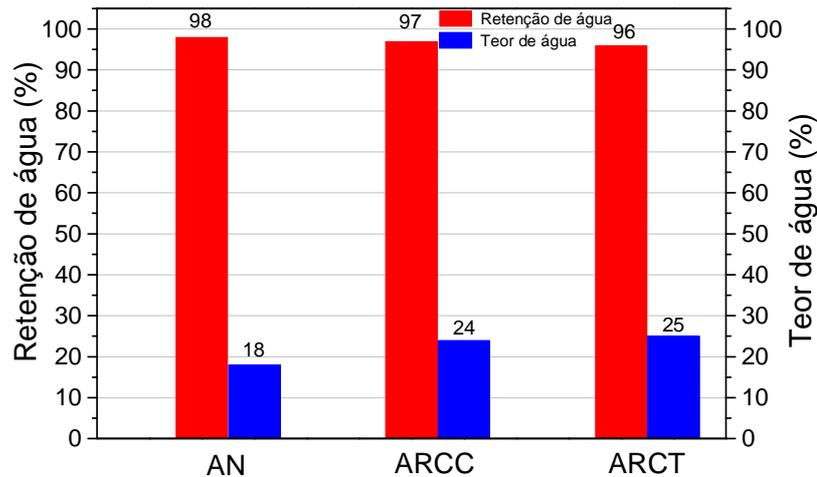


Figura 37 - Relação de retenção de água com os teores de água.

A adoção de um maior teor de água na mistura em geral, resulta em mais água disponível para uma posterior perda de água da argamassa. Segundo Recena (2011) a quantidade de água superior à necessária permanece em estado livre no interior da mistura. Para Rosselo (1973) a capacidade de reter água está relacionada com a tensão superficial da pasta aglomerante. Uma argamassa tende a conservar água necessária para molhar a superfície dos grãos do agregado e do aglomerante. Porém a água em excesso é facilmente cedida por efeito da sucção da base onde será aplicada (SABBATINI, 1986).

Na pesquisa de Hamassaki et al. (1997), mencionado por Neno (2010), a argamassa de referência foi comparada com as argamassas com incorporação de ARC e apresentaram uma retenção menor de água nos agregados provenientes de resíduo de concreto. Os autores atribuem este fato à maior porosidade dos resíduos de concreto, os quais tendem a diminuir a capacidade de retenção de água da mistura. Estes resultados também estão em conformidade com as pesquisas de Campos e Leite (2010), ao verificarem que à medida que são incorporados agregados reciclados nas argamassas (50% e 100%) de RCD, com traço de 1:2, há um decréscimo da retenção de água proporcional.

Nesta pesquisa, de um modo geral, a retenção de água tende a diminuir com a incorporação de ARC, porém a influência é pequena, mantendo as argamassas em uma mesma classe de retenção de água.

4.4.4 Densidade de massa no estado fresco

A 38 apresenta a densidade de massa nas argamassas no estado fresco.

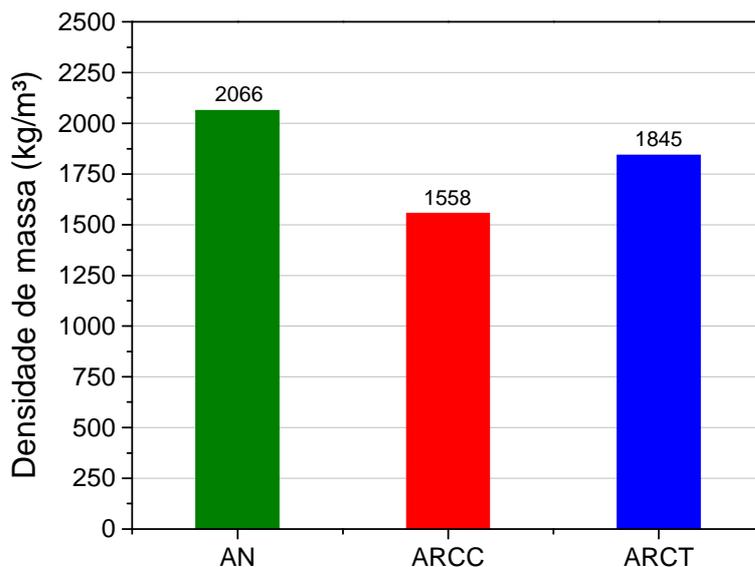


Figura 38 - Densidade de massa das argamassas no estado fresco.

É possível verificar que a argamassa com areia natural apresenta maior densidade de massa (2066 Kg/m^3), quando comparada com as demais argamassas com ARCC e ARCT, 1558 Kg/m^3 e 1845 Kg/m^3 respectivamente. Apesar dos agregados naturais apresentarem uma massa específica menor que os agregados reciclados, percebe-se que as argamassas com ARC apresentam uma menor densidade. A forma dos grãos e a existência de argamassa aderida nas partículas são responsáveis pela maior absorção de água e tornam as argamassas recicladas com densidade de massa menor.

Segundo constatações de Tristão (2005), quanto mais esférico e arredondado for o grão que forma a areia, menor será o volume de vazios de uma argamassa, ou seja, maior o empacotamento dos grãos na mistura. Acredita-se que este fator diminuiu a densidade de massa das argamassas com ARC.

As argamassas com ARCC possuem uma densidade de massa inferior às demais possivelmente também em função do alto teor de ar incorporado visualizado no processo de mistura da argamassa e do elevado teor de água adicionada na mistura. Já as argamassas com ARCT, apresentam uma densidade de massa inferior às argamassas com AN e também pode-se observar uma maior incorporação de ar e água na mistura quando comparadas com a AN.

As maiores quantidades de água e ar incorporado nas argamassas com ARC ocorreram possivelmente, em função da característica lamelar dos grãos de resíduo de concreto, os quais geram excessos de vazios nas argamassas, e que por conseqüência necessitam de maiores teores de água para uma mesma trabalhabilidade.

Dados similares a estes resultados foram encontrados nos estudos de Pedrozo (2008) e Neno (2010), que apontaram que os valores da densidade de massa dos agregados com ARC são menores que a densidade de massa das argamassas com AN.

4.4.5 Teor de ar incorporado

Os resultados obtidos de teor de ar incorporado nas argamassas são apresentados na Figura 39.

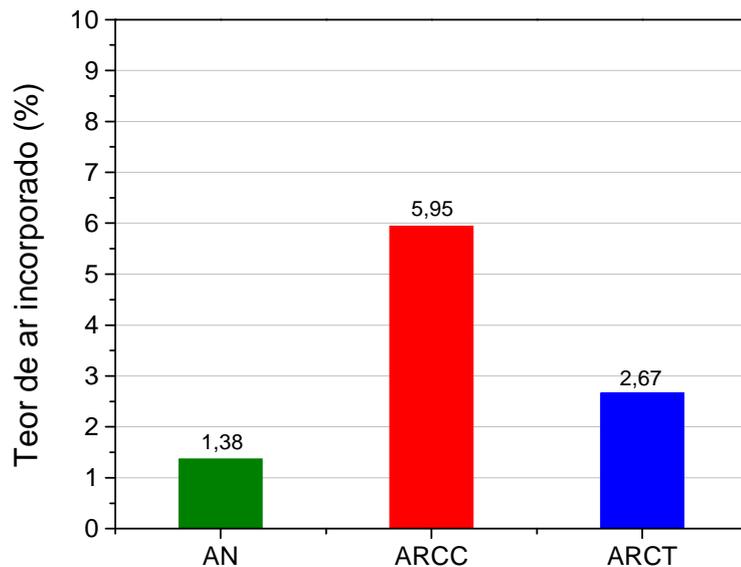


Figura 39 - Teor de ar incorporado.

Embora não esperado, houve uma variação expressiva no teor de ar incorporado entre as três argamassas. A argamassa de referência apresentou o menor teor de ar incorporado (1,38%), quando comparada às demais argamassas com agregado reciclado. Entre as argamassas com ARC, a mistura com os ARCC foi a que apresentou mais ar incorporado (5,95%), seguida da argamassa com ARCT (2,67%), sendo estes resultados coerentes com os resultados de densidade de massa. O alto teor de ar incorporado provoca uma queda na densidade de massa e exerce influência nos ensaio de penetração de cone e squeeze flow. Visualiza-se na Figura 40 a relação entre o teor de ar incorporado e a penetração de cone.

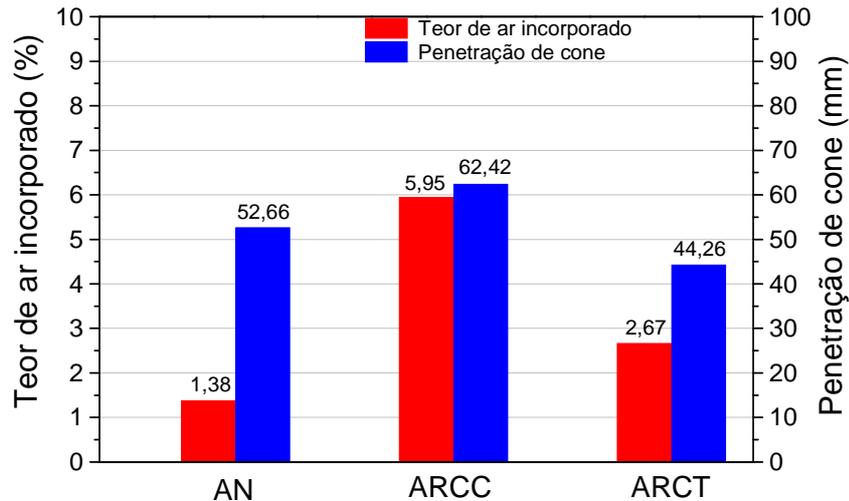


Figura 40 - Comparação dos resultados de teor de ar incorporado e penetração de cone.

Ao correlacionar a argamassa com ARCC, observou-se que o teor de água foi similar ao ARCT e a forma dos grãos é semelhante, neste caso a incorporação de ar teve influência significativa, que resultou numa queda na tensão de cisalhamento, maior penetração de cone, podendo ter resultado uma maior dispersão nos resultados. O fator que pode explicar a maior incorporação de ar na argamassa com ARCC deve-se a distribuição granulométrica do microfino, que possui dimensões do grão maior em relação aos grãos do ARCT.

Essa elevação de teor de ar incorporado nas argamassas com ARC, deve-se provavelmente, à forma dos grãos e a diferença de porosidade intrínseca ao concreto, que originou os agregados utilizados. Não foi possível identificar as causas da diferença de ar incorporado entre ARCC e ARCT.

4.5 ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

4.5.1 Densidade de massa

Os resultados do ensaio de densidade de massa das argamassas com AN, ARCC e ARCT, são apresentados na Figura 41.

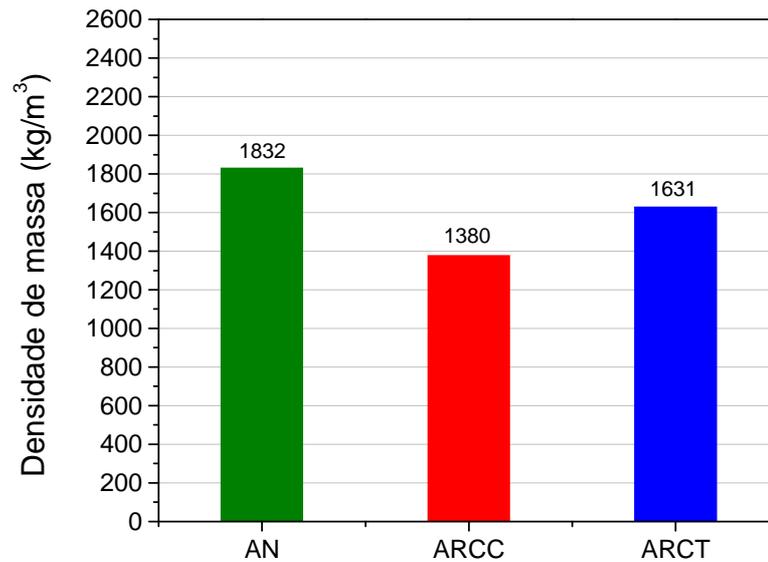


Figura 41 - Resultados médios de densidade de massa.

Os resultados obtidos demonstram que a argamassa com AN possui a maior densidade de massa, com 1832 Kg/m³, seguida da argamassa com ARCT com 1631 Kg/m³ e da argamassa com ARCC com 1380 Kg/m³. As densidades de massa das misturas no seu estado endurecido apresentaram a mesma tendência de comportamento que a densidade de massa no estado fresco, com variações de 25% entre a AN e o ARCC e 11% entre a AN e o ARCT para ambos os estados das argamassas. A explicação para este comportamento é a mesma apontada na densidade de massa das argamassas no estado fresco.

Além destas, a diferença de densidade também pode ser explicada pela curva de distribuição granulométrica dos agregados. A distribuição granulométrica da AN, com o melhor empacotamento, não é a distribuição granulométrica ideal para as argamassas com ARC, resultando em argamassas mais porosas e com índice de vazios superiores à AN. A distribuição granulométrica do microfinos também contribuiu para este comportamento. O microfinos com maior quantidade de grãos de maior dimensão é o do ARCC, que resultou na menor densidade de massa.

Estes resultados estão de acordo com o estudo de Neno (2010), dado que à medida que são incorporados ARC nas misturas, ocorre um decréscimo na densidade de massa das argamassas no estado endurecido.

4.5.2 Resistência mecânica das argamassas

Os valores obtidos a partir dos ensaios de resistência à compressão e de tração na flexão na idade de 28 dias, podem ser visualizados na Figura 42.

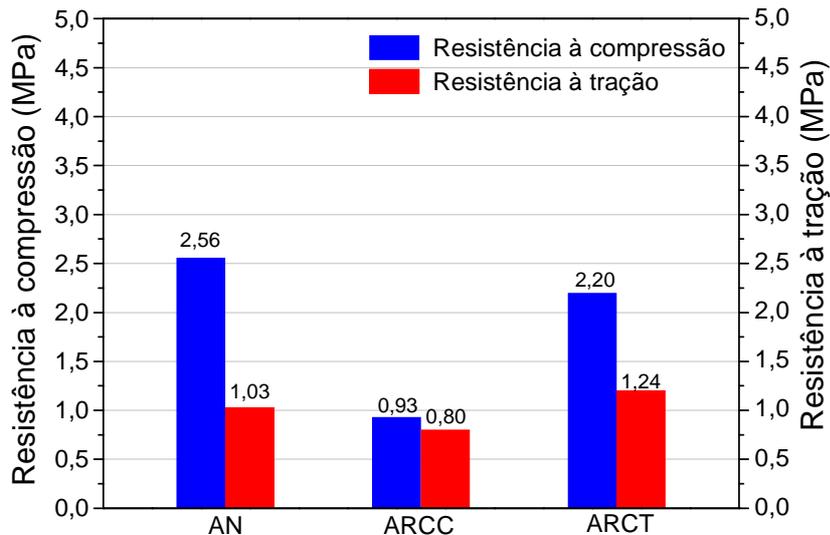


Figura 42 - Resistências à compressão e à tração na flexão média das argamassas.

Aos vinte oito dias de idade todas as misturas com resíduos apresentaram resistências à compressão inferiores à AN. Ao se comparar a resistência das argamassas com AN (2,56 MPa) e ARCC (0,93 MPa), percebe-se que há uma diferença expressiva entre elas com uma variação de 1,63 MPa, resultando em uma diminuição de cerca de 64% na resistência à compressão. A diferença de forma e de composição entre os grãos do ARCC leva a maiores teores de água e maiores teores de ar incorporado na argamassa, o que pode explicar esta perda de desempenho. Observa-se que a forma dos grãos influencia na resistência à compressão e no empacotamento das argamassas, onde a resistência é superior nos traços com agregados de forma mais arredondada e esférica. Estes resultados são coerentes com os estudos de Arnold (2011).

As argamassas com ARCT, se comparadas com a AN, apresentaram resultados de resistência à compressão ligeiramente inferior, com uma diferença na ordem de 14%. Tal fato é coerente com o maior teor de água utilizado (de 18% para 25%), entretanto a queda no valor não é tão expressiva como na argamassa com ARCC, devido à pequena diferença no teor de ar incorporado nesta argamassa. A densidade de massa corrobora com os valores deste ensaio.

Na argamassa com ARCC a diferença de resistência à tração na flexão e resistência à compressão foi muito pequena, não havendo um motivo claro para este comportamento. O comportamento das argamassas com ARC segue o comportamento observado por Pedrozo (2008), onde as resistências à compressão das argamassas, aos vinte e oito dias, com 100% de ARC foram inferiores às resistências das argamassas com AN, chegando a um decréscimo de 18%.

O estudo de Veigas et al. (2009) está parcialmente em conformidade com esta pesquisa, demonstrando uma queda nos valores obtido na resistência mecânica das argamassas com ARC (exceto na resistência à tração na flexão dos ARCT), tanto na resistência à tração na flexão, quanto na resistência à compressão. Na medida em que foi sendo incorporados maiores teores de resíduos à mistura, foram diminuindo as densidades de massa no estado fresco e endurecido, assim como as resistências à compressão.

No entanto, as argamassas com ARC estudadas por estudos de Neno (2010) apresentaram um comportamento diverso, pois o autor observou uma elevação na resistência nas argamassas com até 20% de substituição; um decréscimo para 50% de ARC e voltam a apresentar acréscimo até atingir a porcentagem de incorporação de 100% de ARC. Segundo o autor, dentre as argamassas com agregados provenientes de concreto, a argamassa com 100% de resíduo é aquela que demandou menores teores de água na sua composição, ou seja, para a mesma quantidade de cimento, esta mistura contém menos água (relação a/c), reduzindo-se assim o volume de vazios e proporcionando mais coesão entre as partículas e maior resistência à argamassa.

A resistência à tração na flexão apresenta um comportamento distinto da resistência à compressão. Ao comparar os dois ensaios mecânicos, percebe-se que no ensaio de resistência à tração na flexão houve uma inversão de comportamento entre as argamassas com AN e ARCT, onde o ARCT apresentou a melhor resistência à tração dentre as três, com 1,24 MPa, seguida da AN com 1,03 MPa.

Pedrozo (2008), da mesma forma que o observado na presente pesquisa, aponta o mesmo comportamento das argamassas com ARCT deste ensaio, onde a resistência da argamassa com agregado reciclado foi superior a de referência, exceto para o teor de 25%. Com 100% de ARC, a argamassa apresentou um aumento na resistência à tração de aproximadamente 25% em relação à AN. Segundo o autor, a redução da relação a/c livre nas misturas pode influenciar nos resultados.

A forma das partículas possivelmente influencia no comportamento das argamassas em relação à resistência à tração na flexão das argamassas, gerando maior porosidade e conseqüentemente menor resistência. Neno (2010) obteve resultados similares aos desta pesquisa na resistência à tração na flexão para as argamassas com 100% de ARC, apontando que os agregados provenientes de concreto possuem uma superfície específica maior e são mais angulosas e porosas do que a AN, gerando assim uma ligação mais forte com o cimento existente na mistura. Além disso, os agregados reciclados têm possivelmente

alguma pasta de cimento anidro que, ao entrar em contato com a água de amassamento entra em hidratação e melhora as ligações, melhorando a aderência entre as partículas, aumentando assim a resistência à tração das argamassas. Este comportamento não foi observado na argamassa com ARCC, pois apresentou uma resistência à tração inferior à AN, possivelmente devido ao maior teor de ar incorporado na mistura. Já a argamassa com ARCT, com menor teor de ar incorporado, apresentou melhores resultados de resistência à tração em relação à argamassa com ARCC e em relação à argamassa de referência.

As argamassas com ARCC demonstraram a mesma tendência de comportamento para resistência à compressão e à tração na flexão, apresentando as menores resistências mecânicas. Este fato pode ser explicado em função da argamassa apresentar o maior índice de vazios e o maior teor de ar incorporado. Esses vazios acabam por distanciar um grão do outro de forma a impedir a aderência entre eles. Estes resultados também estão de acordo com Arnold (2011) ao mencionar que a forma dos grãos influencia na resistência mecânica e no empacotamento das misturas, tendo assim resistências mecânicas superiores quando os traços das argamassas são compostos por agregados mais esféricos. Vegas et al. (2009) mencionam ainda, para justificar os mesmos comportamentos observados, que a densidade de massa dos agregados reciclados é menor em relação a AN, o que permite deduzir que as argamassa produzidas com esses agregados será mais leve do que as argamassas de referência, o que resulta em perda de desempenho mecânico.

Os resultados obtidos nos ensaios, tanto de resistência à tração na flexão quanto à compressão encontra-se em conformidade com a pesquisa de Corinaldesi e Moriconi (2009). Os autores compararam a argamassa de referência com as argamassas com incorporação de 10% de agregados provenientes de blocos de concreto pré-moldado.

4.5.3 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Uma das funções primordiais da argamassa de revestimento numa edificação, é a estanqueidade à água quando utilizado em revestimentos externos. Este fenômeno pode ser compreendido através da movimentação da água pelos capilares do revestimento de argamassa utilizando o coeficiente de capilaridade (SILVA, 2006).

Os resultados da absorção de água por capilaridade e de coeficiente de capilaridade são apresentados na Figura 43.

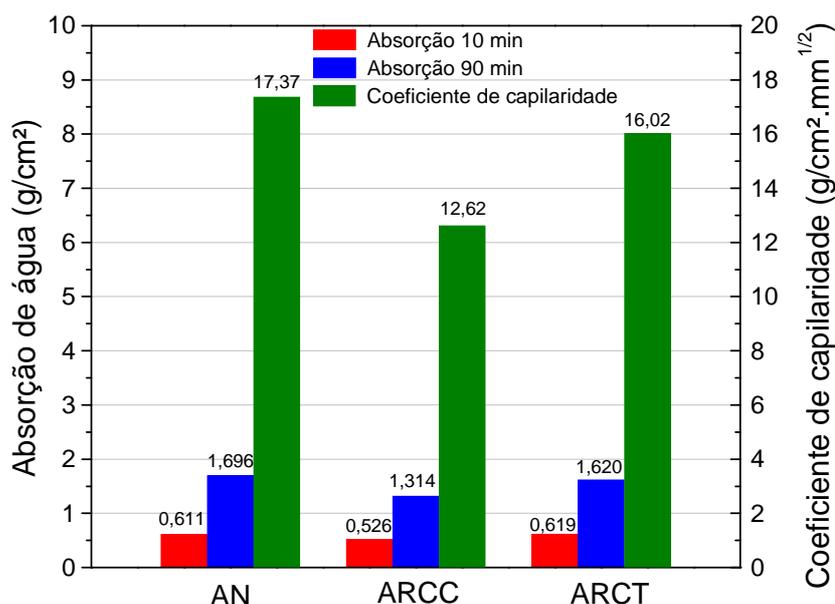


Figura 43 - Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.

No ensaio de absorção de água por capilaridade, as argamassas obtiveram um comportamento inicial, aos dez minutos, semelhante, sendo os maiores valores 0,619 e 0,611 g/cm² obtidos nas argamassas com ARCT e com AN, respectivamente, enquanto que as argamassas com ARCC apresentaram absorção aos dez minutos de 0,526 g/cm².

Observando os resultados aos 90 minutos, a argamassa que apresentou maior absorção de água por capilaridade foi a de referência, seguida pela argamassa com ARCT (5% menor) e a com ARCC 23% inferior em relação à AN. Os coeficientes de capilaridade apresentaram a mesma tendência de comportamento.

Os grãos reciclados possuem forma lamelar e são mais porosos, com tendência a gerar uma melhor ligação com a pasta de cimento, preenchendo, assim, alguns poros que antes seriam preenchidos por água (SILVA et al., 2010).

Silva et al. (2010) também obtiveram resultados semelhantes de 20% a 30% de incorporação de agregados cerâmicos nas argamassas, sendo que, para incorporações com 50% e 100% houve um acréscimo de absorção.

Neno (2010) obteve resultados com comportamentos similares aos obtidos nesta pesquisa, onde a argamassa com AN apresentou o maior coeficiente de capilaridade e a mistura com 100% de ARC o menor valor. O autor também ressalta que, dentre as argamassas com ARC, as misturas com 100% de agregado reciclado apresentaram o menor teor de água

na sua composição, fazendo assim, com que a quantidade de água livre no interior da argamassa seja menor, reduzindo o volume de vazios, aumentando a coesão entre as partículas e diminuindo assim, a capacidade de absorção de água por capilaridade desta argamassa.

Pedrozo (2008) observou um aumento de absorção capilar em argamassa com ARC. Segundo o autor, não se pode afirmar que o aumento da absorção capilar se deva unicamente à presença de agregados reciclados na mistura, mas a uma mudança na estrutura interna da argamassa com a adição desses agregados reciclados.

4.5.4 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

A Figura 44 apresenta os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica real das argamassas.

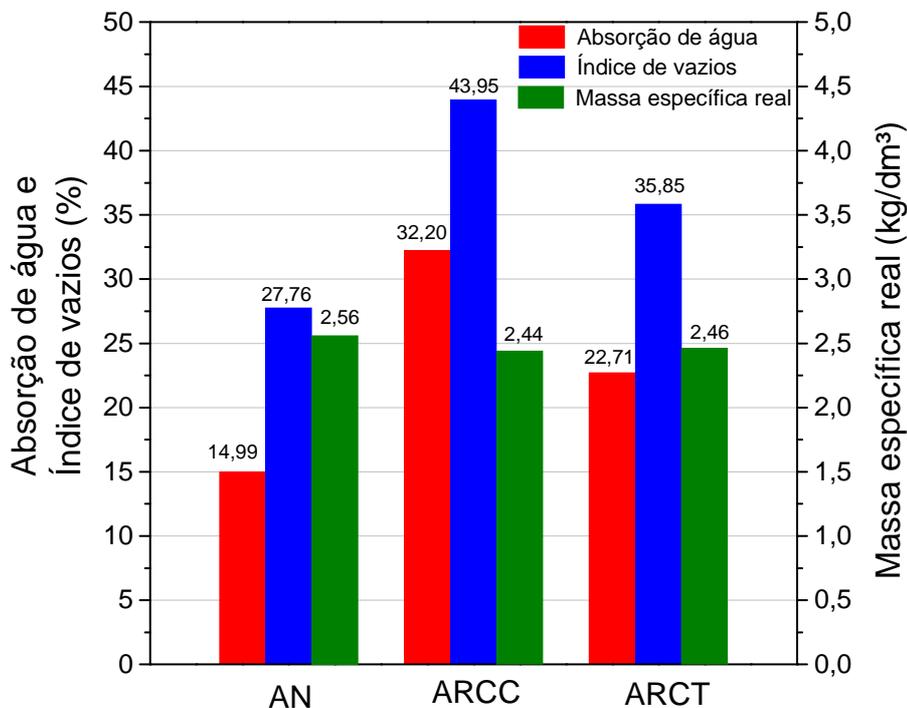


Figura 44 - Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real.

As argamassas que incorporaram agregados reciclados apresentaram maior absorção de água quando comparadas à argamassa com AN, observando-se um aumento de 115% para as misturas com ARCC e 51% para as misturas com ARCT. Da mesma forma, as AN apresentaram o menor índice de vazios, havendo um aumento de 58% para as misturas com ARCC e 29% com ARCT.

Os resultados de massa específica real das argamassas foi inversamente proporcional ao índice de vazios das argamassas, como era esperado. A argamassa com AN,

que apresentou o menor índice de vazios, apresentou a maior massa específica real. Já os valores de massa específica real obtidos para as argamassas com ARC foram muito próximos.

Ao se correlacionar os resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa em pasta, com o teor de ar incorporado e com a resistência à compressão aos ensaios abordados, é possível dizer que todos estão coerentes. De um modo geral, a forma e porosidade dos agregados reciclados influenciaram nos índice de vazios das argamassas, devido à presença de grãos mais angulosos e menos esféricos em relação aos agregados de referência, exigindo maior quantidade de água e incorporando mais ar, resultando em uma queda no empacotamento entre os grãos.

Os resultados dos índices de vazios encontrados na pesquisa estão em conformidade com os estudos de Tristão (2005), segundo o qual está inversamente relacionado com a resistência à compressão da argamassa.

4.5.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 45 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas estudadas.

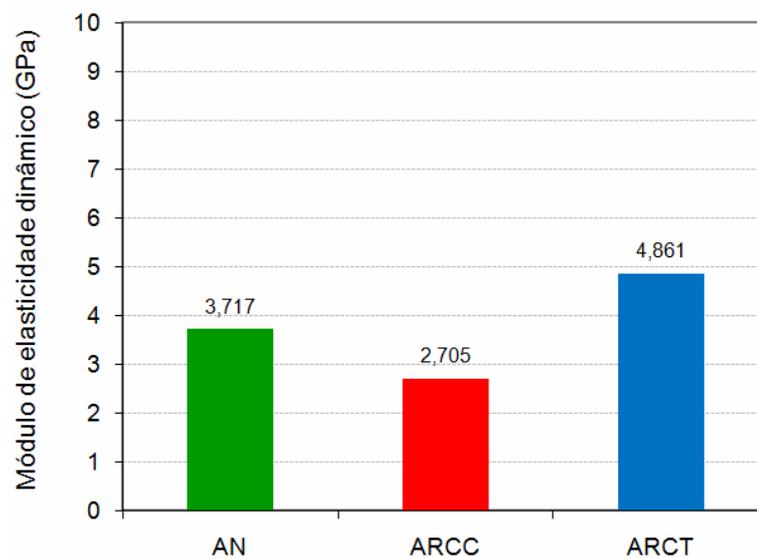


Figura 45 - Módulo de elasticidade dinâmico.

A argamassa com ARCT teve resultado de módulo de elasticidade 31% maior do que a argamassa de referência. Esperavam-se resultados inversos, uma vez que a densidade de massa no estado fresco e endurecido e a resistência à compressão das argamassas com ARCT são inferiores à AN. Acredita-se que o maior módulo de elasticidade na mistura com ARCT

seja em função da diferença de massa específica do agregado ($2,53 \text{ g/cm}^3$), superior à AN ($2,48 \text{ g/cm}^3$). Possivelmente isto seja o principal fator que influencie no módulo de elasticidade dinâmico. Já a argamassa com incorporação de ARCC apresentou o menor módulo de elasticidade, $2,705 \text{ GPa}$, entre as três argamassas ensaiadas, em função maior índice de vazios, e maior porosidade (coerente com a menor densidade de massa e a menor resistência mecânica entre as demais argamassas).

A forma dos grãos possivelmente influenciou nestes resultados, demonstrando que partículas mais arredondadas e esféricas geram argamassas com módulos de elasticidade maiores.

Estes resultados estão parcialmente em conformidade com os estudos de Vegas et al. (2009) e Neno (2010). Segundo o último autor, um maior módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com a maior densidade e o menor índice de vazios.

Ressalta-se que segundo Neno (2010), um maior módulo de elasticidade dinâmico não é positivo, pois o módulo de elasticidade está diretamente relacionado com a fissuração da argamassa. A redução no módulo de elasticidade, se não excessiva, é uma característica favorável para as argamassas, pois o revestimento fica mais deformável, uma vez que permite uma melhor acomodação das tensões e reduz a tendência para as fissuras. (SILVA, 2006; SILVA et al., 2010). Contudo, o módulo de elasticidade não deve ser demasiado baixo, para evitar que as deformações do suporte danifiquem o próprio revestimento. Esta situação é agravada no caso de o módulo de elasticidade do revestimento ser muito superior ao do suporte, uma vez que o revestimento suportará as tensões de compressão mais fortes (Penas, 2008).

4.5.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizado visando caracterizar a distribuição dos poros das argamassas, averiguando a influência dos mesmos na absorção de água e outras propriedades da argamassa endurecida. Os resultados de porosimetria são apresentados na Figura 46 e na Figura 47.

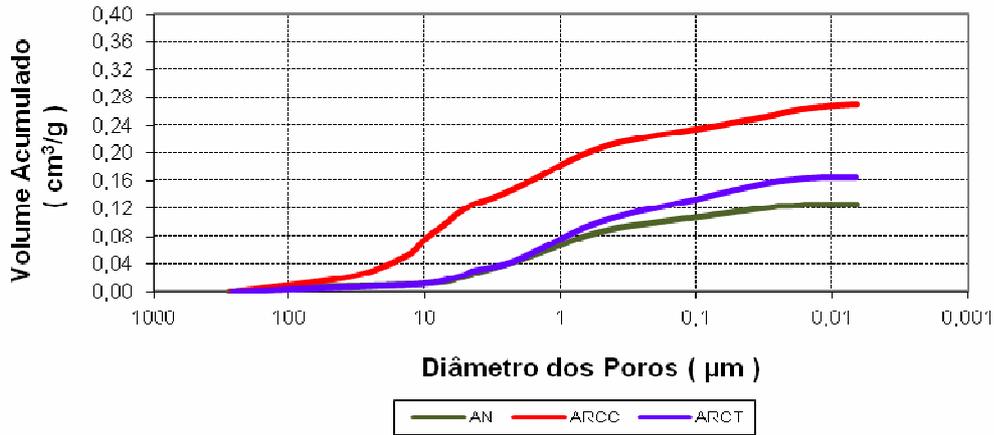


Figura 46 - Volume de poros acumulados nas argamassas.

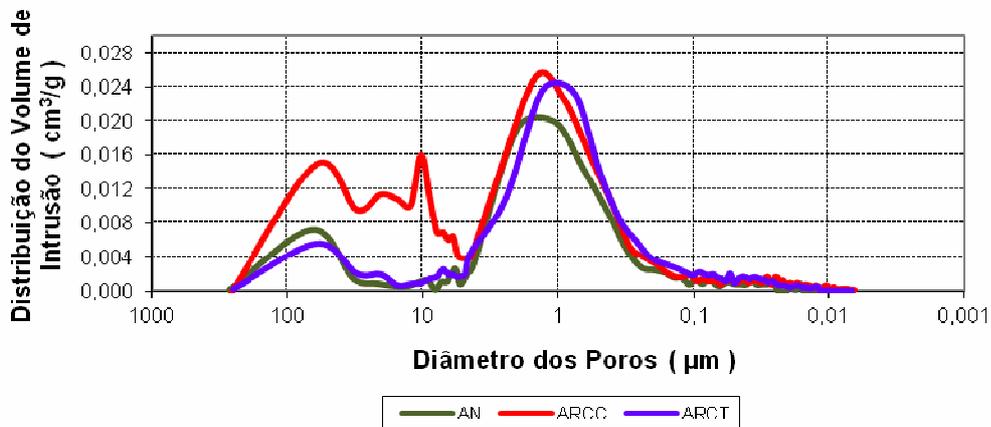


Figura 47 - Distribuição de poros das argamassas.

Observa-se que o resultado de volume total de poros das argamassas é corrente com o resultado de índice de vazios e a absorção de água por imersão, sendo que a utilização de ARC resultou em argamassa com maior volume de poros.

A distribuição de poros das argamassas com AN e ARCT são semelhantes entre si. A argamassa com ARCC, entretanto, tem uma maior quantidade de poros na faixa entre 0,07 μm e 7 μm (a argamassa com ARCC possui cerca de 6% do poro total capilar nesta faixa de 10 μm a 70 μm, enquanto as demais argamassas possuem cerca de 1% nesta faixa).

A diferença de comportamento da argamassa deve-se possivelmente à distribuição granulométrica de seu microfinos, que é mais grosso que as demais, e cuja dimensão se enquadra nesta faixa granulométrica.

Segundo Petri (2004), quanto maior o teor de água adicionada à mistura maior será a porosidade. Os poros responsáveis pela permeabilidade são os macroporos interconectados (10 μm a 50 nm), que formam uma rede de poros. Nestas condições, os

resultados de distribuição de poros das argamassas encontram-se coerentes com a absorção de água, logo que a argamassa com ARCC apresentou as maiores porcentagens de macroporos, seguida da mistura com ARCT e AN.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

A diferença de morfologia e composição entre os agregados naturais e os ARC, exerce grande influência nas propriedades das argamassas no estado fresco, uma vez que os agregados reciclados apresentam forma com uma menor esfericidade e arredondamento dos grãos, quando comparados aos grãos da AN, bem como uma maior absorção de água. Este conjunto de fatores resultou em maior teor de água das argamassas com ARC, para atingir a consistência padronizada.

A diferença de morfologia do grão influencia também a trabalhabilidade da argamassa uma vez que os grãos mais esféricos, tais como a AN, resultam em argamassas com uma menor viscosidade em relação às argamassas com ARC, que possuem forma mais lamelar.

Os teores de água adicionados para cada tipo de argamassas seguem a tendência de comportamento observada nos resultados da bibliografia consultada. A elevada absorção dos agregados reciclados, acabou diminuindo a quantidade de água livre e, por consequência, a trabalhabilidade das argamassas. Neste estudo foi necessário realizar a compensação desta água para se atingir o índice de consistência especificado e os valores obtidos foram de 18% para misturas com AN, 24% para as misturas com ARC com cura convencional e 25% para os ARC com cura térmica.

Ao incorporar ARC nas argamassas, tem-se uma alteração dos resultados no ensaio de squeeze flow. Para uma mesma velocidade de aplicação de carga (0,1mm/s) para ambas as argamassas, o deslocamento foi de 1728µm para as argamassas com ARCT e 1854 µm com ARCC, e de 2455µm para a argamassa AN, ou seja, há uma variação de quase 30%.

As características morfológicas dos grãos influenciam na trabalhabilidade das argamassas, uma vez que as partículas mais arredondadas da AN “deslizam” melhor que os agregados reciclados, proporcionando uma boa trabalhabilidade da mistura.

Apesar da maior demanda de água nas argamassas com ARCT, as características morfoscópias do grão foram predominantes, tornando as argamassas menos trabalháveis. Os ARCC apresentam forma de grão similar aos ARCT, e as argamassas com estes agregados tiveram demanda de água muito parecidas. Entretanto, houve maior incorporação de ar nas argamassas com ARCC, o que pode ter gerado a maior penetração de cone nestas argamassas.

Em relação à retenção de água nas argamassas, todas misturas apresentaram pouca diferença entre os resultados, com 98% para argamassa com AN, 97% para argamassa com ARCC e 96% para ARCT.

Analisando-se a densidade das argamassas no estado fresco, percebe-se que as misturas com ARC, ao incorporarem maiores teores de ar e demandarem maiores teores de água na mistura das argamassas, resultaram em uma densidade inferior à argamassa de referência.

Constata-se que quanto menor for o arredondamento e a esfericidade da forma dos agregados (caso das argamassas com ARC), menor é a densidade de massa das argamassas. Ao se incorporar ARC na composição das argamassas, estas resultaram numa densidade de massa inferior às misturas com AN, com valores de 2066 Kg/m³ para as argamassas com AN, 1558 Kg/m³ com ARCC e 1845 Kg/m³ com ARCT. Foi constatado que a argamassa com ARCC apresentou a menor densidade de massa em relação às demais argamassas analisadas, provavelmente em função do alto teor de ar incorporado visualizado no processo de amassamento da argamassa.

Quanto ao teor de ar incorporado nas argamassas, conclui-se que na argamassa de referência (1,38%), esse índice é inferior quando comparado às argamassas com ARCC e ARCT, 5,95% e 2,67%, respectivamente. Este comportamento deve-se provavelmente a forma dos grãos, a porosidade intrínseca do resíduo e à sua interação com o procedimento de mistura adotado neste trabalho.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A incorporação de agregado reciclado de concreto nas argamassas alterou as propriedades do estado endurecido.

As três argamassas (AN, ARCC e ARCT), apresentaram diferenças de densidade de massa, que é menor nas argamassas com ARC. Tal explicação pode ser dada através da forma dos grãos, onde a areia AN, que apresentou uma melhor forma, resultou em um melhor empacotamento, menor volume de vazios, produzindo assim, argamassas com maior densidade de massa no estado fresco e endurecido.

O uso de agregados reciclados originou argamassas mais porosas e com índices de vazios superiores à AN, com menor resistência mecânica e menor módulo de elasticidade dinâmico, exceto as argamassas com ARCT, que apresentaram a maior resistência à tração na flexão e maior módulo de elasticidade dinâmico.

A forma lamelar e a porosidade dos grãos dos agregados reciclados influencia a resistência mecânica das argamassas, tanto nos ensaios de resistência à compressão, quanto nos ensaios de resistência à tração na flexão. As argamassas com ARC possuem maior teor de ar incorporado na mistura e, por consequência, de um modo geral, menor resistência à compressão. A forma e a composição destes grãos resultam em maiores demandas de água que prejudicam a resistência à compressão. Em contrapartida, esta característica morfológica se pronunciou de forma positiva na resistência à flexão na tração, pois a forma lamelar propicia melhor aderência da argamassa com os grãos. Além disso, os ARC possuem cimento anidro na sua composição que, ao entrar em contacto com a água de amassamento, passa a completar as suas reações hidráulicas e completar a ligação, melhorando a aderência entre as partículas, aumentando assim, coesão e resistência entre as partículas.

A forma e a composição dos grãos também influencia na capacidade de absorção de água por capilaridade. A argamassa com AN apresentou um coeficiente de capilaridade superior às argamassas com ARC que demonstraram que a presença de resíduos de concreto reduz a absorção de água no capilar aumentando a impermeabilidade do material e evitando algumas patologias, principalmente se estas argamassas forem aplicadas no meio externo. A aderência dos grãos lamelares com a pasta de cimento preenche alguns poros que antes seriam favoráveis a serem preenchidos por água, influenciando na capacidade de absorção de água por capilaridade.

Analisando-se as argamassas com ARC em relação à argamassa de referência, observa-se que as primeiras apresentaram os maiores índices de absorção de água por imersão. A argamassa com ARCC apresentou uma absorção 115% maior do que a argamassa com AN e a argamassa com ARCT apresentou uma absorção 52%, demonstrando que a forma dos grãos dos agregados interfere nesta propriedade. Estes resultados estão coerentes com o índice de vazios e massa específica real desta pesquisa.

O índice de vazios das argamassas recicladas possivelmente foi influenciado pela forma e porosidade dos ARC, devido à presença de grãos mais angulosos e menos esféricos em relação aos agregados de referência, que exigiram maior quantidade de água e incorporam mais ar, resultando em uma queda no empacotamento entre os grãos, além da densidade de massa e resistências mecânicas. A resistência mecânica da argamassa está relacionada de forma inversamente proporcional ao volume de vazios.

O módulo de elasticidade apresentou resultados inversos ao esperado, uma vez que a argamassa com ARCT tenderia a apresentar um valor menor em relação à argamassa

com AN, quando correlacionado a densidade de massa no estado fresco e endurecido e a resistência à compressão. Possivelmente o comportamento, contrário ao esperado, dos resultados do módulo do ARCT e da AN seja em função da massa específica. Este acréscimo de valor não é considerado positivo, pois o módulo de elasticidade está diretamente relacionado com a fissuração da argamassa.

A distribuição de poros das argamassas de referência e de ARCT, são semelhantes entre si. Porém a argamassa com ARCC, possui cerca de 6% do poro total capilares na faixa de 10 μm a 70 μm , enquanto as demais argamassas possuem cerca de 1% nesta faixa. A diferença de comportamento da argamassa com ARCC deve-se possivelmente à distribuição de seu microfinos, que é mais grosso que as demais, e cuja dimensão se enquadra nesta faixa granulométrica. Os macroporos interconectados (10 μm a 50 μm) são os responsáveis pela permeabilidade das argamassas, diante disso, a argamassa com ARCC apresentou as maiores porcentagens de permeabilidade, seguida da mistura com ARCT e AN.

Verifica-se que há expressivas alterações nas propriedades das argamassas, em função da substituição do agregado natural de rio pelos agregados reciclados de concreto, e que entre estes pode haver diferenças significativas de comportamento.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o melhor conhecimento do comportamento de agregados reciclados de concreto frente às propriedades das argamassas, sugere-se:

- Avaliar a possibilidade de adição de microfinos, na produção de argamassas com agregados reciclados de concreto;
- Verificar outras formas de incorporação de agregado reciclado de concreto em argamassas e outras formas de dosar estas argamassas, visando alcançar bom desempenho e alta durabilidade;
- Estudar a influência de aditivos plastificantes na produção de argamassas com agregados finos reciclados de concreto;
- Analisar a influência da incorporação de 100% de agregados de concreto nas argamassas, frente à resistência a aderência das argamassas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULO, S. C; KAHN, H; JOHN, V. M; ULSEN, C. **Metodologia de Caracterização de Resíduos de Construção e Demolição**. In: VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas aplicações. Anais. São Paulo, 2003. CT 206 – IBRACON.

ABBAS, A. *et al.* Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. **Materials Characterization**, v. 60, n. 7, p. 716-728, Jul 2009. ISSN 1044-5803. Disponível em: <<Go to ISI>://000266997200016 >.

ABESC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM, disponível em: <<http://www.abesc.org.br/pdf/mambiente.pdf>>, acesso em: 15 de janeiro de 2011.

ALAEJOS, P.; VAZQUEZ, E.; MARTINEZ, F.; POLANCO, A.; ALEZA, F.; PARRA, J. L.; BURÓN, M. Draft of spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings...** França: Elsevier publications, 2004.

ALIPIO, A. P. R. **Reciclagem do entulho da indústria da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2010. 117p.

ALMEIDA, S. L. M.; BISPO, L. H. O. **Obtenção de areia artificial a partir de finos de pedreiras – análises de ensaios**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia (Boletim Técnico), 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 201. **Guide to Durable Concrete**. Detroit, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 187. Standard test method for normal consistency of hydraulic cement**. Philadelphia: 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 780. Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortar for plain and reinforced unit masonry**. Philadelphia: 1996.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos**. In: (Ed.). V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas: São Paulo. Anais ANTAC, 2003. p.383-398.

ANGULO, S. C. *et al.* **Aperfeiçoamento da reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição – uso em concreto**. In: (Ed.). Seminário: O uso da fração fina da britagem: São Paulo. Anais: SUFFIB, 2005. p.6.

ANGULO, S. C. **Caracterização de Agregados de Resíduos da Construção e Demolição**

Reciclados e a Influência de suas Características no Comportamento de Concretos. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. 167p.

ANGULO, S. C., ULSEN, C., KAHN, H. e JOHN, V. M. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: VI Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. São Paulo (2003.)

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimento de argamassa.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia/Construção Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Influência da seqüência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliada por squeeze-flow.** In: (Ed.). Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas: Anais: ANTAC, Florianópolis, 2005. p.158-179.

ARAUJO, G.S. **Estudos de parâmetros texturais das areias para argamassas de revestimento através da análise de imagens.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo

ARNOLD, D. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011, 145p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação de consistência.** Rio de Janeiro: 2005b.

_____. **NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e**

tetos – requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15259: Argamasa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15839: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – caracterização reológica pelo método squeeze-flow** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7389: Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 8820: Ligas de zinco - Determinação de alumínio - método volumétrico.** Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9979: Determinação do fator de rigidez (K) de um sistema de ensaio de tração - método de ensaio** Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR NM 248: Agregados – determinação da distribuição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 30: Agregado miúdo: Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45: Agregados – determinação da densidade de massa e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 47: Concreto - determinação do teor de ar em concretos frescos – método pressiométrico.** Rio de Janeiro: 2002.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11579: Cimento Portland - determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200).** Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12819: Concreto e Argamassa - determinação da elevação adiabática da temperatura.** Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 15.116: Agregados Reciclados de resíduos sólidos da construção**

civil – utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland – determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 7221: Agregados para concreto - especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7225: Materiais de pedra e agregados naturais.** Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 7809: Agregado graúdo - determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 248: Agregados – determinação da distribuição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45: Agregados – determinação da massa unitária e espaço de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo – determinação de massa aparente e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 65: Cimento Portland - determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 76: Cimento Portland - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL - ANEPAC acessado em 23/04 2012: <http://anepac.org.br/wp/mercado/informe-estatistico/>

BALLISTA, L. P. **Microconcretos Leves Estruturais com Agregados Graúdos Reciclados Modificados com Látex Estireno-Butadieno – Estudo das Propriedades Físicas, Mecânicas e de Durabilidade.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

BASTOS, P. K. X. *et al.* **Areia de britagem para argamassas e concretos - a experiência de Juiz de Fora, MG.** Brasil In: (Ed.). ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11. Florianópolis, 2006.

BASTOS, P. K. X. *et al.* **Argamassas de Revestimento compostas com areia de brita - A experiência de Juiz de Fora/MG.** In: (Ed.). SUFFIB - SEMINÁRIO: O USO DA FRAÇÃO FINA DA BRITAGEM: São Paulo. Anais, 2005.

BASTOS, P. K. X. *et al.* Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas de revestimento. **Ambiente Construído (São Paulo), Porto Alegre**, v. 2, n. 2, p. 57-70, 2002.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia/Construção Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BAUER, E. *et al.*, Eds. **Argamassas de revestimento - características e peculiaridades.** Brasília: SINDUSCON-DF/LEM-UnB, p.92ed. 2005.

BAUER, E. et al. Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC,2005. p. 95-

BERNARDES, A. *et al.* Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. **Ambiente Construído, Porto Alegre**, v. 8, n. 3, p. 65-76, 2008.

BOUQUETY, M. N. et al. Experimental study of crushed aggregate shape. **Construction and Building Materials**, n. 21 , p. 865 – 872, 2007.

BRAGA, M. B. C. **Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão Efeito de microfinos e pozolânico.** Dissertação (Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

BRASIL. Ministério das Cidades. Disponível em: <http://www.mp.go.gov.br/portalweb/hp/9/docs/rsudoutrina_24.pdf>. Acesso em 28 outubro 2011.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8500: Part 2. Concrete – complementary british standard to BS EN 206-1 – part 2: specification for constituent materials and concrete.** London, 2002. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/63405192/BS-8500-2-2006-Concrete-%E2%80%93-Complementary-British-Standard-to-BS-EN-206-1%E2%80%93Part-2-Specification-for-constituent-materials-and-concrete>>. Acessado em 30 outubro 2011.

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

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BUTTNER, A. M. **Uso de Agregados Reciclados de Concreto em Blocos de Alvenaria Estrutural**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

BUTTNER, A. M.; CORRÊA, M. R. S.; PRADO, D. M.; RAMALHO, M. A. Avaliação das propriedades de agregados reciclados de concreto gerados em uma fábrica de pré-moldados. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, 2006.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedade mecânica e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

CABRAL, K.O. **Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito-gnaise nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido**. 259p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, 2007

CAMPOS, R. N.; LEITE, M. B. **Estudo da consistência e retenção de água de argamassa recicladas**. In: (Ed.). SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA: Feira de Santana. Anais...Feira de Santana: UEFS, 2010. p.730-734.

CARASEK, H. . **Argamassas**. In: G. C. Isaia. (Org.). **Materiais de Construção Civil**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007, v. 1, p. 863-904.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L.M.B. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4, 2001, Brasília. **Anais...** Brasília: 2001.

CARDOSO, F. A. *et al.* **Caracterização reológica de argamassas do mercado por squeeze-flow**. In: (Ed.). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 7: Anais, Recife, ANTAC, 2007.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, n. 39, p. 748 - 753, 2009

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Caracterização reológica de argamassa pelo método de squeeze-flow**. In: (Ed.). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6: Anais. Florianópolis, ANTAC, 2005. p.121-143.

CARNEIRO, A. P. **Características do entulho e do agregado reciclado**. In: CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S., *et al* (Ed.). **Reciclagem de Entulho para Produção de Materiais de Construção: projeto entulho bom**. Salvador: EDUFBA, 2001.

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

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Proposta do método de penetração do cone para o controle de produção de argamassas em obra. **e-Mat (Porto alegre)**, v. 3, n. 2, p. 77-90, 2006.

CASTRO, A.L.; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, n. 55, p. 18-32, 2009

CAVALHEIRO, A. P. Contribuição para a implementação de agregado reciclado de concreto em uma empresa de pré-fabricado de concreto. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. (Boletim Técnico 68).

CONAMA (2002) – Conselho Nacional do Meio Ambiente – **Resolução CONAMA 307 de 05 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>, acesso em: 20 de março de 2010.

CONAMA (2004) – Conselho Nacional do Meio Ambiente – **Resolução CONAMA 348 de 16 de agosto 2004**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res04/res34804.xml>>, acesso em: 15 de janeiro de 2010.

CORINALDESI, v; MORICONI, G (2007); “Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate”, *Construction and Building Materials*, V. 23, N.º 1, pp. 289-294; disponível em: <http://wenku.baidu.com/view/c476880879563c1ec5da71ca.html>

CORTES, D. D. et al. Rheological and mechanical properties of mortars prepared with manufactured sands. **Cement and Concrete Research**, n. 38, p. 1142 - 1147, 2008

COSTA, M. R. M. M. ; Alécio . **Estudo da influência de aditivo dispersante no comportamento reológico de argamassas de revestimentos**. In: 3o.Congresso Português de Argamassas, 2010, Lisboa. 3o.Congresso Português de Argamassas. Lisboa : APFAC, 2010. v. 1. p. 1-9

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos. 2006**. Tese (Doutorado em Engenharia/Construção Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CROWTHER, P. Building deconstruction in Australia. In: KIBERT, C. J.; CHINI, A. R. **Overview of deconstruction in selected countries**. Florida: CIB - International Council for Research and Innovation in Building Construction, 2000. cap. 2, p. 14-44.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 37, p. 735–742, 2007

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. In: **Original Research Article Cement and Concrete Research**, v.37, n. 5, p. 735-742, 2007.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M.; HENDRICKS, C. F.; VAN MAASAKKERS, M. H. J. The role and influence of recycled aggregate, in “recycled aggregate concrete”. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings...** França: Elsevier publications, 2004. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=5YFZvDdw0VUC&oi=fnd&pg=PA665&dq=The+role+and+influence+of+recycled+aggregate,+in+%E2%80%9Crecycled+aggregate+concrete%E2%80%9D.&ots=a5E5cLAoHT&sig=kuJcTPbTIy4i11IrsnYLefdTx8Q#v=onepage&q=The%20role%20and%20influence%20of%20recycled%20aggregate%2C%20in%20%E2%80%9Crecycled%20aggregate%20concrete%E2%80%9D.&f=false>>. Acessado em 30 outubro 2011.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; Microestrutura analysis of hardened recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**. v.58, p.683-690, 2006.

FERREIRA, L. M. M. Betões estruturais com incorporação d agregados grossos reciclados de betão -Influência da pré-saturação. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2007.

FERREIRA, R. M. **Optimização da vida útil das estruturas de bertão armado**. In: 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia das Estruturas-2006.

FHWA - FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, United States. 2000. **Report n2 FHWA-PL-00-025 - Recycled materiais in european highway environments: Uses, technologies, and policies**. Disponível em: < <http://international.fhwa.dot.gov/pdfs/recycolor.pdf>>. Acesso em: 28 de outubro.2011.

FREITAS, C. **Argamassas de revestimento com agregado miúdo de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. 135

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

GONÇALVES, P. C. M. **Concreto com agregados reciclados. Análise comentada da legislação existente**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2009.

GUERREIRO, M. R. F. **Utilização de Aditivo Estabilizador de Hidratação (AEH) como Proposta de Reciclagem dos Resíduos de Concreto Usinado**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Gestão Tecnológica. Centro Universitário FEEVALE, Novo Hamburgo, RS, 2007.

HAMASSAKI, L. T.; NETO, C. S.; FLORINDO, M. C. **“Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria”**, Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil, Workshop EPUSP/ANTAC, São Paulo, Brasil, pp. 107-115;.

HANSEN, T.C. **“Recycling of demolished concrete and masonry”**, E&FN Spon, London, UK, 1992.

JADOVSKI, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

KAZMIERCZAK, C.S.; KULAKOWSKI, M. P.; BOITO, D.; GARCIA, A. C.A. **Estudo comparativo da geração de resíduos de construção e demolição em São Leopoldo e NovoHamburgo**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído-ENTAC, 2006.

KHEDER, G.F; AL-WINDAW, A.S, Variation in mechanical properties of natural and recycled aggregate concrete as related to the strength of their binding mortar, **Materials and Structures** 38 (2005) 701- 709

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F.; CHAN, H. C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 9, p. 1403-1410, set. 1999

LA SERNA, H. A. **Agregados para Construção Civil**. Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=5451 . [Acesso em 02 de maio de 2011], 2009.

LAURITZEN, E. K. Recycling concrete – an overview of development and challenges. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings...** França: Elsevier publications, 2004.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

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 em Engenharia Civil, São Carlos, Brasil

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Porto Alegre, 2007. 180p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LUCENA, L. F. L. *et al.* **Diagnóstico da geração de resíduos da construção civil no Município de Campina Grande**. In: (Ed.). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 4., ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO: Porto Alegre. Anais, 2005.

MARGALHA, M. G. L. B. **Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o factor tempo na sua qualidade.** Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.

MENEZES, R.R; FARIAS FILHO, J; FERREIRA, H.S.; NEVES, G.A; FERREIRA, H.C.; Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. **Cerâmica [online]**. 2009, vol.55, n.335, pp. 263-270

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Acessado em 23 de fevereiro de 2012: http://www.mme.gov.br/programas/pormin/galerias/arquivos/publicacoes/informacoes_minerais/agregados_minerais_propiedades_aplicabilidade_ocorrencias.pdf

MIRANDA, L. F. R. ; ANGULO, S. C. ; CARELI, E. D. . A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído (Online)**, v. 9, p. 57, 2009.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75 μ m on mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 615-624, Nov 2006. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<Go to ISI>://000238875500002 >.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. **Desempenho de revestimentos de argamassas com entulho reciclado.** Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP, BT/PCC/277, S. Paulo, SP, 2001.

MUELLER, A. Closed loop of concrete rubble? In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 7., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Comitê Técnico CT-206 Meio Ambiente (IBRACON), 2006, CDROM. (palestra apresentada durante o evento).

NENO, C. J. F. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão.** Dissertação (Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

NIEBEL, P. R.; CAMPITELI, V. C. **Avaliação no desempenho no estado fresco de argamassas com agregados miúdos britado utilizando curvas granulométricas parabólicas.** In: (Ed.). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 8: Curitiba. Anais SBTA, 2009.

OBLA, K.; KIM, H., LOBO, C. Crushed returned concrete as aggregates for new concrete. Final report. RMC Research e Education Foundation. 2007.

OLIVEIRA, M. B.; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**. v.13, n. 1-3, p.113-117, 1996.

OLIVEIRA, M. J. E. de. **Materiais descartados pelas obras de construção civil: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem.** Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2002.

PAUL K, P. et al.. **An alternative to AN sand.** Kerala, Índia, 2003. 137 f. Monografia (B. Tech. degree in Civil Engineering) – Departament of Civil Engineering, Mahatma

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PENAS, F. E. (2008); **Argamassas de cal hidráulica para revestimentos de paredes,** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;

PILEGGI, R.G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários.** 187p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001

PINTO, T. P.; GONZALES, J. L. R.; **Manejo e Gestão de Resíduos.** Manual: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios. Brasília: Caixa, 2005.

POON, C. S.; KOU, S. C. Properties of Cementitious Rendering Mortar Prepared with Recycled Fine Aggregates. **Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition**, v. 25, n. 6, p. 1053-1056, Dec 2010. ISSN 1000-2413. Disponível em: < <Go to ISI>://000285495900033 >.

POON, C. S.; QIAO, X. C.; CHAN, D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 578-585, 2006.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**. v.16, p.281-289, 2002.

POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S.C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete.

PURIFICAÇÃO, C. A. **Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição de cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto.** Belo Horizonte, 103 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

RECENA, F.A.P. **Conhecendo argamassa.** Porto Alegre, RS: EDIPUCRS, 2011.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente.** São Paulo, Escola Politécnica da USP. (Boletim Técnico 02), 1986.

SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** São Paulo: O nome da Rosa, 2000.

SAEED, A.; HAMMONS, M. I.; REED, J. L. **Comprehensive Evaluation, Design, and Construction Techniques for Airfield Recycled Concrete Aggregate as Unbound Base.** In: (Ed.). Transportation Research Board 86th Annual Meeting. Washington DC, United States, 2007. p.16.

SAMPAIO, R. G.; BASTOS, P. K. X. **Estudo de granulometria de areia de britagem para argamassa de revestimento.** In: (Ed.). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS: Anais. Curitiba, ANTAC, 2009. p.1-11.

SANCHEZ, M J. **Estudio sobre la utilizacion de arido reciclado para la fabricacion de Hormigon Estructural.** Departamento de Ingenieria Civil: Construccion – Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2004

SCHULTMANN, F.; RENTZ, O. The state of deconstruction in Germany. In: KIBERT, C. J.; CHINI, A. R. **Overview of deconstruction in selected countries.** Florida: CIB - International Council for Research and Innovation in Building Construction, 2000. cap. 3, p. 45-74. Disponível em: < <http://cibworld.xs4all.nl/dl/publications/Pub%20252/Chap03.pdf> >. Acesso em: 21 nov. 2011.

SILVA, J. R. M. C. **Incorporação de resíduos de barro vermelho em argamassas cimentícias.** Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006a.

SILVA, J.; DE BRITO, J.; VEIGA, R. (2010). Recycled red – clay ceramic construction and demolition waste for mortars production. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 22, No. 3, (March 2010), 236 – 244, 0899-1561.

SILVA, N. G. ; CAMPITELI, V. C. . **Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento.** In: II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2006, Ponta Grossa. II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2006.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Dissertação (Mestrado em Engenharia/Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006b.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. **Argamassa com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas.** In: (Ed.). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6. Florianópolis. Anais ANTAC, 2005a. p.13- 21.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.; GLEIZE, P. J. P. **A influência dos finos de areia de britagem de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento.** In: (Ed.). Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas: Recife. VII SBTA.2007a.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.; GLETZE, R. J. R. I. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia de britagem de rocha calcária.** In: (Ed.). VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas: Anais CD ROM Recife: UFPH/ANTAC/GTARGAMASSAS, 2007b.

SILVA, NARCISO G.; CAMPITELI, VICENTE C. (2008); “Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia”,

Ambiente Construído, N.º8, pp. 21-35;

SILVA, R. P.; BARROS, M. M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow**. In: (Ed.). SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6. Florianópolis. Anais ANTAC, 2005b. p.106- 120.

SOUZA, C. A. **Utilização de Resíduo de Concreto como Agregado Miúdo para Argamassa de Concretos Estruturais Convencionais**. Belo Horizonte, . p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

TAM, V. W. Y. *et al.* New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 364-369, 2008.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 879-886, 2007

TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4, 2001, Brasília. **Anais...** Brasilia: 2001.

TOPÇU, I. B. Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 27, n. 12, p.1817-1823,1997.

TOPÇU, I. B.; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**. v.34, n.8, p.1307-1312, 2004.

TOPÇU, I. B.; BILIR, T. (2010); “Experimental investigation of drying shrinkage cracking of composite mortars incorporating crushed tile fine aggregate”, *Materials and Design*, V. 31, N.º 9, pp. 4088-4097;

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo. 2010.

VEGAS, I. AZKARATE, A. JUARRERO, M. FRÍAS; “**Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón**”. *Materiales de Construcción*, Vol 59, No 295 (2009). doi:10.3989/mc.2009.44207

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2003. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VIEIRA, L. B - CAUSAS, CUSTOS E POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA A REDUÇÃO DO DESCARTE DE RESÍDUOS EM CENTRAIS DOSADORAS DE CONCRETO - **Seminário COPEL de Sustentabilidade da Cadeia Produtiva do Concreto, 53º Congresso Brasileiro**

do Concreto – IBRACON 2011

WERLE, A. P. Determinação de propriedade de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo: 2010.

APÊNDICE A

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Tabela A1 - Distribuição granulométrica da AN.

Peneiras		Massa (%)	
Série Normal	Série Intermediária	Retida	Acumulada
9,5		0	0
	6,3	1	1
4,8		2	3
2,4		7	10
1,2		10	20
0,6		17	37
0,3		36	73
0,15		23	96
	0,075	3	99
Fundo		1	100

Tabela A2 - Distribuição granulométrica da ARCC.

Peneiras		Massa (%)	
Série Normal	Série Intermediária	Retida	Acumulada
9,5		0	0
	6,3	2	2
4,8		17	19
2,4		23	42
1,2		19	61
0,6		14	75
0,3		13	88
0,15		6	94
	0,075	3	97
Fundo		3	100

Tabela A3 - Distribuição granulométrica da ARCT.

Peneiras		Massa (%)	
Série Normal	Série Intermediária	Retida	Acumulada
9,5		0	0
	6,3	2	2
4,8		15	17
2,4		24	41
1,2		18	59
0,6		13	72
0,3		14	86
0,15		7	93
	0,075	4	97
Fundo		3	100

APÊNDICE B

Tabela B – Compensação do teor de microfinos da AN lavada para a AN não lavada.

Massa de microfinos aderido aos grãos (%)						
fração		#1,2 mm	#0,6 mm	#0,3 mm	#0,15mm	#0,075mm
AN	% grãos (*)	17,9	32,1	29,4	18,5	2,1
	Microfinos (%)	0,6	1,0	2,8	3,4	19,8
		0,107	0,321	0,823	0,629	0,416
	% total de microfinos	2,3				
ARCC	% grãos (*)	17,9	32,1	29,4	18,5	2,1
	Microfinos (%)	2,8	2,8	3,6	13,2	52
		0,501	0,899	1,058	2,442	1,092
	% total de microfinos	6,0				
ARCT	% grãos (*)	17,9	32,1	29,4	18,5	2,1
	Microfinos (%)	2,8	3,2	3,2	14,2	55,2
		0,501	1,027	0,941	2,627	1,159
	% total de microfinos	6,25%				

* Teor da distribuição granulométrica da AN com o melhor empacotamento (ARNOLD 2011).

Tabela C2 - Distribuição granulométrica do microfinos do ARCC.

Sample Ref	: Laje	Ultrasounds	: 0	s
Type product	:	Concentration	: 155	
Client	: Amanda	Diameter at 10%	: 7.25	mu
Comments	:	Diameter at 50%	: 39.54	mu
Liquid	: Alcool	Diameter at 90%	: 79.29	mu
Dispersing agent	: Nenhum	Mean diameter	: 42.40	mu
Operator	: Jaqueline	Fraunhofer		
Company	:	Density/Factor	-----	
Location	:	Specific surface	-----	
Date : 11/07/2011	Time : 11:52:47	Automatic dilution	: No / No	
Index meas.	: 551	Meas./Rins.	: 60/60/4	
		SOP	: Padrão LAPROM	

		Standards classes									
		in volume / undersize									
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	
Q3	0.10	0.27	0.37	0.80	1.40	1.72	1.82	1.87	1.94	2.06	
q3	0.02	0.02	0.02	0.04	0.10	0.07	0.03	0.02	0.03	0.06	
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20	
Q3	2.20	2.35	2.51	2.67	2.84	3.01	3.36	3.72	4.08	4.44	
q3	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30	
Q3	4.78	5.11	5.43	5.72	6.00	6.26	6.51	6.76	6.99	7.32	
q3	0.26	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.30	0.29	0.30	
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	
Q3	7.65	8.05	8.34	8.62	8.98	9.40	9.80	10.19	10.58	10.97	
q3	0.32	0.31	0.33	0.33	0.34	0.34	0.35	0.37	0.40	0.42	
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	
Q3	11.36	12.16	13.01	13.89	14.80	15.76	16.75	17.78	18.84	19.94	
q3	0.45	0.50	0.58	0.66	0.75	0.85	0.94	1.05	1.15	1.26	
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00	
Q3	21.08	22.24	23.44	24.68	25.96	28.61	32.82	35.75	38.75	41.77	
q3	1.38	1.48	1.61	1.75	1.89	2.08	2.43	2.78	3.05	3.26	
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00	
Q3	44.77	47.75	50.66	54.89	57.60	63.97	67.54	70.92	75.18	78.13	
q3	3.44	3.61	3.72	3.83	3.91	3.96	4.02	4.02	4.05	3.96	
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0	
Q3	80.85	84.84	87.55	90.39	92.71	94.58	96.05	97.21	98.95	99.71	
q3	3.83	3.58	3.24	2.88	2.51	2.14	1.78	1.48	1.01	0.45	
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0	
Q3	99.86	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
q3	0.25	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0	
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %

Tabela C3 - Distribuição granulométrica do microfinos do ARCT.

Sample Ref	: Estaca	Ultrasounds	: 0	s
Type produit	: Cinzas de carvão	Concentration	: 163	
Client	: Amanda	Diameter at 10%	: 4.27	mu
Comments	:	Diameter at 50%	: 32.19	mu
Liquid	: Alcool	Diameter at 90%	: 64.56	mu
Dispersing agent	: Nenhum	Mean diameter	: 33.83	mu
Operator	: Jaqueline	Fraunhofer		
Company	:	Density/Factor	-----	
Location	:	Specific surface	-----	
Date : 11/07/2011	Time : 11:45:54	Automatic dilution	: No / No	
Index meas.	: 550	Meas./Rins.	: 60/60/4	
		SOP	: Padrão LAPROM	

Standards classes

in volume / undersize

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.10	0.28	0.38	0.83	1.44	1.79	1.92	2.02	2.14	2.32
q3	0.02	0.02	0.02	0.04	0.10	0.08	0.04	0.04	0.05	0.09
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.52	2.73	2.96	3.19	3.42	3.67	4.16	4.67	5.18	5.68
q3	0.11	0.13	0.16	0.18	0.19	0.22	0.24	0.29	0.32	0.35
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	6.17	6.65	7.10	7.54	7.96	8.36	8.76	9.14	9.51	10.06
q3	0.37	0.40	0.40	0.42	0.43	0.44	0.46	0.47	0.48	0.51
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	10.59	11.27	11.76	12.24	12.85	13.57	14.25	14.91	15.55	16.18
q3	0.52	0.54	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.64	0.66	0.69
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	16.80	18.03	19.27	20.51	21.76	23.03	24.32	25.63	26.97	28.34
q3	0.72	0.78	0.86	0.95	1.04	1.14	1.24	1.35	1.47	1.59
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	29.72	31.13	32.57	34.03	35.51	38.55	43.25	46.45	49.68	52.90
q3	1.69	1.83	1.96	2.08	2.21	2.42	2.75	3.08	3.32	3.53
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	56.07	59.18	62.22	66.62	69.45	76.10	79.67	82.88	86.57	88.93
q3	3.68	3.82	3.94	4.04	4.13	4.19	4.07	3.87	3.55	3.21
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	90.96	93.72	95.42	97.03	98.18	98.97	99.45	99.74	100.00	100.00
q3	2.90	2.51	2.06	1.66	1.26	0.92	0.59	0.38	0.15	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / mu Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %

APÊNDICE D**Tabela D – Estudo piloto das argamassas com ARCC para fixar o teor de água.**

Agregado	Teste	Quantidade de água (g)	Massa específica (g/cm ³)	Penetração de cone (mm)
ARCC	1	414,41	692,0	44,73
	2	420,41	693,4	47,8
	3	426,41	681,8	56,0
	4	432,41	685,8	48,43
	5	432,41	689,3	49,61
	6	432,41	686,7	55,03
	7	442,11	683,3	61,37

