UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ÍTALO VALE MONTE JÚNIOR

INFLUÊNCIA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO NO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS MISTAS PARA USO EM REVESTIMENTO

NATAL
2017

ÍTALO VALE MONTE JÚNIOR

INFLUÊNCIA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO NO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS MISTAS PARA USO EM REVESTIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em engenharia civil.

Orientadora: Profª. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

NATAL
2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Sistema de Bibliotecas – SISBI
Catalogação da Publicação na Fonte - Biblioteca Central Zila Mamede

Monte Júnior, Ítalo Vale.

Influência do agregado reciclado de concreto no comportamento de argamassas mistas para uso em revestimento / Ítalo Vale Monte Júnior. - 2017.

98 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2917.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

1. Construção civil – Dissertação. 2. Concreto - Agregado reciclado – Dissertação. 3. Construção – Resíduo sólidos - Dissertação. 4. Argamassa - Dissertação. 5. Desempenho - Dissertação. I. Sá, Maria das Vitórias Vieira Almeida de. II. Título.

RN/UF/BCZM CDU 666.97

ÍTALO VALE MONTE JÚNIOR

INFLUÊNCIA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO NO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS MISTAS PARA USO EM REVESTIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em engenharia civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof.ª Dr.ª MARIA DAS VITÓRIAS VIEIRA ALMEIDA DE SÁ – Orientador (UFRN)

Prof. Dr. KLEBER CAVALCANTI CABRAL – Examinador Interno (UFRN)

Prof.ª Dr.ª ANA CECILIA VIEIRA DA NOBREGA – Examinadora Externa à Instituição (UFPE)

Natal/RN, 25 de agosto de 2017.

Dedico esse trabalho à minha família, razão de tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, porque sem Ele não teria conseguido realizar esse sonho.

A minha esposa Ana Paula Monte e ao meu filho, Arthur Luiz Monte, pelo amor sem limites. Sem vocês não teria conseguido.

Aos meus pais, Ítalo Monte e Maria de Fátima, aos meus irmãos Paulo Ricardo e Tázia Maria, pelo amor e amizade de sempre.

A amiga, professora, conselheira e orientadora Maria das Vitórias, pela parceria firmada ao longo desse trabalho.

A ECOCIL, nas pessoas dos Diretores Eduardo Bezerra e em especial, ao amigo Antônio José Bezerra, por entenderem a importância da qualificação profissional, proporcionando a liberação para o desenvolvimento desse mestrado.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de construção da UFRN, Sandro Ricardo e “seu Chico”, pelo apoio de sempre.

Ao grupo de pesquisa do PET – UnP, nas pessoas dos alunos Eric Rodrigues, Aline Lima, André Nunes, Iúri Alves, Kéricles Pinheiro, Ashaphy Nascimento, Flaviano Santos e Aretuza pela ajuda no trabalho mais árduo dessa dissertação que foi o peneiramento dos agregados.

Aos alunos e amigos: Jemima Tábita, Carlos Leal, Allan Barbalho e Rosângella Silva, pela ajuda na confecção das argamassas e também no peneiramento dos agregados.

Ao ex-aluno e amigo Hugo Diniz pela ajuda na análise do DRX, modelagem estatística e também no peneiramento dos agregados.

Aos meus amigos e colegas de mestrado: Cinthia Maia, Danyel Paiva, Lucy Kheyler, Ruan Landolfo e Thiago Fonseca, pela parceria nas disciplinas e nas pesquisas laboratoriais, sobretudo pela amizade. Sem vocês essa caminhada teria sido bem mais árdua.

Por fim, aos professores do PEC, pelo apoio e transmissão de conhecimento.

A todos, o meu muito obrigado.

INFLUÊNCIA DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO NO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS MISTAS PARA USO EM REVESTIMENTO

Ítalo Vale Monte Júnior

Orientadora: Profª. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

RESUMO

A atividade da construção civil promove um grande passivo ambiental devido ao elevado consumo de energia e recursos naturais não renováveis, além de gerar grandes volumes de resíduos sólidos que muitas vezes são destinados inadequadamente. Desse modo, a utilização dos resíduos sólidos de construção e demolição (RCD) como agregado reciclado torna-se uma alternativa viável para mitigar o impacto da construção civil ao meio ambiente. O agregado reciclado de concreto (ARC), principalmente, a fração grossa (ARCG, com diâmetro maior que 4,8 mm), apresenta qualidade superior aos agregados reciclados misto, podendo ser utilizado na produção de novos concretos. Por outro lado, a fração fina (ARCF, com d < 4,8 mm), contém maior teor de argamassa aderida ao grão de ARC, apresentando qualidade inferior ao ARCG o que dificulta sua utilização em novos concretos ou argamassas. Neste contexto, o objetivo dessa pesquisa é avaliar o comportamento de argamassas para revestimento com a substituição do agregado natural (AN) pelo resíduo de concreto (ARCF). Avaliou-se experimentalmente a relação cal/cimento (de 0,3 a 1,7) e a substituição do AN por ARCF (de 15 a 85%) na produção de 14 argamassas, sendo 9 delas com ARCF e 5 de referência, padronizando o perfil granulométrico dos AN e ARCF, a relação ligante/agregado em 1:3 e o índice de consistência em 260 mm. Inicialmente avaliou-se as características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais dos agregados por análise da massa unitária, da massa específica, granulométrica a laser, BET, FRX, DRX e MEV, além da Abrasão Los Angeles, teor de argamassa, absorção de água e índice de reatividade para o ARCF. Em seguida, avaliou-se as propriedades das argamassas nos estados anidro, plástico e endurecido através dos ensaios de granulometria por peneiramento, massa unitária, densidade de massa, índice de consistência, variação de massa, absorção de água por capilaridade e imersão, resistências à tração na flexão e compressão, módulo de elasticidade dinâmico, resistência de aderência e índice de fissuração. Constatou-se que os valores médios do teor de argamassa, perda por abrasão Los Angeles, absorção de água e densidade no ARCF, assemelham-se às indicações da literatura. Nas argamassas ocorreu uma redução da densidade de massa com o aumento do ARCF que também contribuiu para o aumento das resistências à tração na flexão, compressão e módulo de elasticidade. Sem indicação de fissuras aos 56 dias de cura, nas argamassas com ARCF, a resistência de aderência obteve valores mínimos aceitáveis (0,3 MPa) para revestimento, porém não apresentaram significância estatística.

Palavras-Chave: Resíduo da construção civil. Agregado reciclado de concreto. Argamassa. Desempenho.

INFLUENCE OF THE RECYCLED CONCRETE AGGREGATE IN THE BEHAVIOR OF MIXED MORTARS FOR COATING USE

Ítalo Vale Monte Júnior

Adviser: Profª. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá

ABSTRACT

The construction activity promotes a large environmental liability due to the high consumption of energy and non-renewable natural resources, besides generating large volumes of solid waste that are often inadequately destined. Thus, the use of solid construction and demolition wastes as a recycled aggregate becomes a viable alternative to mitigate the impact of construction on the environment. The recycled concrete aggregate (RCD), mainly the coarse fraction (CRCA, with diameter greater than 4.8 mm), presents superior quality to the mixed recycled aggregates, being able to be used in the production of new concretes. On the other hand, the fine fraction (FRCA, with d < 4.8 mm), contains a higher content of mortar adhered to the RCA grain, presenting inferior quality to the CRCA and restricting its use in new concretes or mortars. In this context, the objective of this research is to evaluate the behavior of mortars for coating with the substitution of the natural aggregate (NA) for the concrete residue (FRCA). The lime / cement ratio (from 0.3 to 1.7) and the substitution of NA by FRCA (from 15 to 85%) in the production of 14 mortars were evaluated experimentally, 9 of them with FRCA and 5 of reference, standardizing The grain size profile of the NA and FRCA, the binder / aggregate ratio in 1: 3 and the consistency index in 260 mm. The physical, chemical, mineralogical and microstructural characteristics of the aggregates were evaluated by analyzing the bulk density, the specific apparent weight, laser grain size, BET, FRX, DRX and MEV, as well as Los Angeles abrasion, mortar content, water absorption and reactivity index for FRCA. Then, the properties of the mortars in the anhydrous, plastic and hardened states were evaluated through the granulometry tests by sieving, bulk density, consistency, weight variation, water absorption by capillarity and immersion, flexural tensile and compressive strenght, dynamic modulus of elasticity, adhesion strength and susceptibility cracking. It was found that the average values of mortar content, Los Angeles abrasion loss, water absorption and density in FRCA, are similar to those reported in the literature. In the mortars a reduction of bulk density occurred with the increase of the FRCA that also contributed to the increase of flexural tensile, compression strengths and modulus of elasticity. No cracks were observed at 56 days of cure, in FRCA mortars, the adhesion strength obtained minimum acceptable values (0.3 MPa) for coating, but did not present statistical significance.

Key-words: Waste from construction. Recycled concrete aggregate. Mortar. Performance.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Pesquisas com uso de ARC em argamassa..... 4

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Diferentes tipos de ARC..... 8
Figura 2.2 - (a) Densidade aparente versus teor de argamassa no ARC; (b) Absorção de água versus teor de argamassa no ARC..... 11
Figura 2.3 - Relação entre resistência por abrasão e teor de argamassa no ARC..... 12

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Fluxo de fases do programa experimental..... 21
Figura 3.2 - Pontos experimentais do DCCR..... 25
Figura 3.3 - Beneficiamento do resíduo de concreto no canteiro de obras..... 29
Figura 3.4 - Agregados retidos na peneira de malha 4,75 mm..... 32
Figura 3.5 - Redução de amostra do agregado miúdo natural por quarteamento. 33
Figura 3.6 - Sequência do procedimento para avaliação do teor de argamassa na fração fina do ARCF..... 35
Figura 3.7 - Procedimento de misturas dos materiais secos e quantidade de argamassa seca produzida por agrupamentos de análises..... 39
Figura 3.8 - Sequência do procedimento para definição da consistência das argamassas..... 43
Figura 3.9 - Sequência do procedimento de preparação das argamassas..... 44
Figura 3.10 - Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado..... 45
Figura 3.11 - Moldagem e cura dos corpos-de-prova 4 x 4 x 16 cm..... 46
Figura 3.12 - Aferição da velocidade do pulso ultrassônico..... 48
Figura 3.13 - Ensaios de resistências à tração na flexão e compressão..... 49
Figura 3.14 - Ascensão capilar nas argamassas dos pontos axiais..... 50
Figura 3.15 - Absorção de água e índice de vazios das argamassas..... 51
Figura 3.16 - Parede com chapisco e taliscamento dos painéis..... 52
Figura 3.17 - Aplicação da argamassa nos painéis..... 53

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Distribuição granulométrica - (a) cimento CP II - Z; (b) cal CH I..... 56
Figura 4.2 - Amostra do ARCF após choque térmico e dissolução em ácido clorídrico..... 57
Figura 4.3 - Relação linear entre a absorção de água, teor de argamassa e resistência superficial por abrasão Los Angeles no ARCF..... 59
Figura 4.4 - Perfis granulométricos das amostras do AN..... 61
Figura 4.5 - Distribuição granulométrica dos grãos do AN menores que 0,075 mm..... 61

Figura 4.6 - Perfis granulométricos médios dos ARCF..... 62
Figura 4.7 - Perfis granulométricos menores que 0,075 mm - (a) ARCF 1; (b) ARCF 2; (c) ARCF 3..... 63
Figura 4.8 - Perfis granulométricos médios dos AN e ARCF..... 64
Figura 4.9 - Difratogramas - (a) ARCF 1 e (b) ARCF 3..... 65
Figura 4.10 - Difratogramas - (a) ARCF 2 e AN..... 66
Figura 4.11 - Morfologia e textura dos agregados - (a) e (c) do AN; (b) e (d) do ARCF 1; (e) e (f) indicação da região onde foi realizado o EDS para o AN e ARCF..... 67
Figura 4.12 - Distribuição granulométrica das argamassas com ARCF e de referência..... 71
Figura 4.13 - Relação módulo de finura versus massa unitária..... 72
Figura 4.14 - Relação índice de consistência versus a/ms..... 73
Figura 4.15 - Variação de massa ao longo do tempo..... 74
Figura 4.16 - Módulo de elasticidade dinâmico..... 75
Figura 4.17 - Resistência à tração na flexão..... 76
Figura 4.18 - Superfície de resposta para a resistência à tração na flexão..... 78
Figura 4.19 - Resistência à compressão..... 78
Figura 4.20 - Superfície de resposta para a resistência à compressão..... 80
Figura 4.21 - Absorção de água por capilaridade..... 80
Figura 4.22 - Superfície de resposta para a absorção de água por capilaridade.. 82
Figura 4.23 - Absorção de água versus índice de vazios..... 82
Figura 4.24 - Aspecto da superfície do reboco após acabamento..... 85
Figura 4.25 - Resistência de aderência à tração..... 86
Figura 4.26 - Superfície de resposta para a resistência de aderência à tração..... 87

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Propriedades físicas, químicas e mineralógicas do ARCF..... 9
Tabela 2.2 - Características dos agregados naturais e reciclados de concreto.... 13

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Níveis utilizados no DCCR para produção de argamassas..... 25
Tabela 3.2 - Matriz dos experimentos..... 26
Tabela 3.3 - Composição química do cimento Portland CP II Z - 32..... 27
Tabela 3.4 - Propriedades física e mecânica do cimento Portland CP II Z - 32.... 27
Tabela 3.5 - Propriedades química e física da cal hidratada..... 28
Tabela 3.6 - Ensaios de caracterização dos agregados miúdo natural e reciclado de concreto..... 31
Tabela 3.7 - Consumo dos materiais constituintes das argamassas..... 40
Tabela 3.8 - Ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido..... 47

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Comparativo entre massas unitária, específica e índice de vazios do ARCF e AN..... 57
Tabela 4.2 - Teor de argamassa aderida ao ARCF..... 58
Tabela 4.3 - Comparativo entre absorção de água, teor de argamassa e resistência superficial por abrasão Los Angeles no ARCF..... 59
Tabela 4.4 - Distribuição granulométrica das amostras do agregado natural..... 60
Tabela 4.5 - Distribuição granulométrica das amostras do agregado reciclado.... 62
Tabela 4.6 - Propriedades físicas dos agregados a partir da granulometria..... 64
Tabela 4.7 - Composição química por FRX dos finos passantes na malha 0,075 µm..... 65
Tabela 4.8 - Reatividade do ARCF em argamassas de cimento e cal..... 68
Tabela 4.9 - Propriedades das argamassas nos estados anidro e plástico..... 69
Tabela 4.10 - Matriz de planejamento..... 70
Tabela 4.11 - Coeficientes de regressão para a resposta de resistência à tração 77
Tabela 4.12 - ANOVA para a resistência à tração..... 77
Tabela 4.13 - Coeficientes de regressão para a resposta de resistência à compressão..... 79
Tabela 4.14 - ANOVA para a resistência à compressão..... 79
Tabela 4.15 - Coeficientes de regressão para a resposta coeficiente de capilaridade..... 81
Tabela 4.16 - ANOVA para o coeficiente de capilaridade..... 81
Tabela 4.17 - Avaliação qualitativa da trabalhabilidade das argamassas..... 84
Tabela 4.18 - Coeficientes de regressão para a resposta de resistência de aderência..... 86
Tabela 4.19 - ANOVA para a resistência de aderência à tração..... 87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 2

1.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA 3
1.2 OBJETIVOS 5
1.2.1 Objetivo geral 5
1.2.2 Objetivos específicos 5
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 5

2 REVISÃO DA LITERATURA 8

2.1 CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC) 8
2.1.1 Teor de ligantes no resíduo de concreto 10
2.1.2 Densidade aparente e absorção de água 10
2.1.3 Resistência superficial 11
2.2 APLICAÇÕES DO ARC EM ARGAMASSAS 12

3 METODOLOGIA 21

3.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL 22
3.2 MATERIAIS 27
3.2.1 Cimento 27
3.2.2 Cal 28
3.2.3 Agregados natural e reciclado de concreto 28
3.2.4 Água 30
3.3 MÉTODOS DE ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL 30
3.3.1 Caracterização dos ligantes 30
3.3.2 Coleta e caracterização dos agregados 30
3.3.2.1 Granulometria dos agregados por peneiramento e a laser 32
3.3.2.2 Teor de argamassa aderido ao ARCF 34
3.3.2.3 Absorção de água por imersão 36
3.3.2.4 Índice de abrasão Los Ángeles 36
3.3.2.5 Área superficial BET 37
3.3.2.6 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) 37
3.3.2.7 Análise química por Fluorescência de Raios-X (FRX) 37
3.3.2.8 Análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) 37
3.3.2.9 Índice de reatividade 38
3.3.3 Procedimentos no estado anidro 38
3.3.3.1 Mistura seca dos materiais constituintes da argamassa 38
3.3.3.2 Massa unitária 40
3.3.3.3 Distribuição granulométrica 41
3.3.4 Procedimentos no estado fresco 42
3.3.4.1 Índice de consistência das argamassas 42
3.3.4.2 Preparação das argamassas 43
3.3.4.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado 44
3.3.4.4 Moldagem e cura dos corpos-de-prova 45
3.3.5 Procedimentos no estado endurecido 46
3.3.5.1 Variação de massa 47

3.3.5.2 Densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico.....48
3.3.5.3 Resistências à tração na flexão e compressão.....49
3.3.5.4 Coeficiente de capilaridade.....49
3.3.5.5 Absorção de água e índice de vazios.....51
3.3.5.6 Índice de fissuração e resistência de aderência.....52

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....56

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES.....56
4.1.1 Granulometria a laser e área superficial.....56
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....56
4.2.1 Avaliação quantitativa do teor de argamassa no ARCF.....57
4.2.2 Relação entre absorção de água, teor de argamassa e perda por abrasão Los Angeles.....58
4.2.3 Distribuição granulométrica dos agregados.....60
4.2.4 Composição química e mineralógica dos finos passantes na malha 75 µm.....64
4.2.5 Morfologia dos agregados por MEV.....65
4.2.6 Índice de reatividade.....68
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....69
4.3.1 Avaliação no estado anidro.....70
4.3.1.1 Distribuição granulométrica das argamassas.....70
4.3.1.2 Massa unitária.....72
4.3.2 Avaliação no estado plástico.....72
4.3.2.1 Índice de consistência das argamassas.....72
4.3.2.2 Densidade de massa.....73
4.3.3 Avaliação no estado endurecido.....74
4.3.3.1 Variação de massa.....74
4.3.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....75
4.3.3.3 Resistências à tração na flexão e compressão.....76
4.3.3.4 Coeficiente de capilaridade.....80
4.3.3.5 Absorção de água e índice de vazios.....82
4.3.4 Avaliação de desempenho.....83
4.3.4.1 Trabalhabilidade.....83
4.3.4.2 Índice de fissuração e resistência de aderência.....85

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....89

5.1 CONCLUSÕES.....89
5.1.1 Análise dos ligantes e agregados.....89
5.1.2 Caracterização no estado anidro.....90
5.1.3 Caracterização do estado plástico.....90
5.1.4 Caracterização no estado endurecido.....90
5.1.5 Trabalhabilidade de desempenho.....91
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....92

REFERÊNCIAS.....93

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil responde por uma grande parcela da degradação ao meio ambiente, logo a atividade é bastante consumidora de energia, seus materiais são constituídos basicamente de recursos naturais e é grande geradora de resíduos sólidos, além de gerar gases de efeito estufa.

Em relação à indústria da construção, Neno *et al.* (2014), afirmam que a atividade não é só um dos maiores geradores de resíduos, mas também consome uma parcela significativa de todo o recurso natural extraído. Esse extrativismo é evidenciado quando Neville e Brooks (2013) externam que aspectos ambientais estão afetando cada vez mais a obtenção de agregados, devido às restrições para extração e problemas com a destinação de resíduos.

O passivo ambiental da construção civil é evidenciado pelo exponencial crescimento da população mundial, a partir do final do século XVII, que associado ao desenvolvimento tecnológico tem contribuído para o aumento da geração dos resíduos sólidos urbanos (MENESES e MONTE JÚNIOR, 2014). A ausência de áreas para destinação ambientalmente adequada dos rejeitos e seu alto potencial de contaminação, potencializam a problemática ambiental.

Por esses motivos apresentados, Kisku *et al.* 2017 comentam que a indústria da construção é o setor com maior impacto ambiental.

Na União Europeia, os resíduos de construção e demolição (RCD) geram pelo menos 180 milhões de toneladas por ano. Apesar do grande potencial reciclável, cerca de 75% dos resíduos são eliminados em aterro (CORINALDESI e MORICONI, 2009). Segundo Samiei *et al.* (2015), na maioria dos países desenvolvidos, o RCD ainda é eliminado principalmente em aterros – quer em aterros específicos ou áreas municipais de resíduos sólidos urbanos (RSU).

No Brasil, a geração de RCD per capita pode ser estimada em 500 kg/hab.ano pela média de algumas cidades brasileiras (PINTO, 1999). Segundo Picchi (1993), os valores médios encontrados para os volumes de RCD gerado são de 0,10 m^3/m^2 de área construída.

Contrário aos países desenvolvidos, no Brasil é recorrente a destinação inadequada dos resíduos sólidos urbanos. Apesar da existência de legislação vigente que regulamenta o manejo dos resíduos sólidos da construção civil (principalmente a

Resolução CONAMA nº 307/2002 e a Lei nº 12.305/2010) o destino final do RCD contraria os preceitos legais.

Segundo Jonh (2001), nenhuma sociedade conseguirá atingir o desenvolvimento sustentável sem que o setor da construção civil passe por profundas transformações. Assim, torna-se essencial intervir para incentivar práticas de construção mais sustentáveis (NENO *et al*. 2014).

Nos dias atuais, é imprescindível mudar a postura da indústria e sociedade, buscando o desenvolvimento sustentável. Para a construção civil alcançar esse patamar é necessário o uso racional de recursos naturais e energia, além de minimizar os rejeitos oriundos da atividade.

1.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TEMA

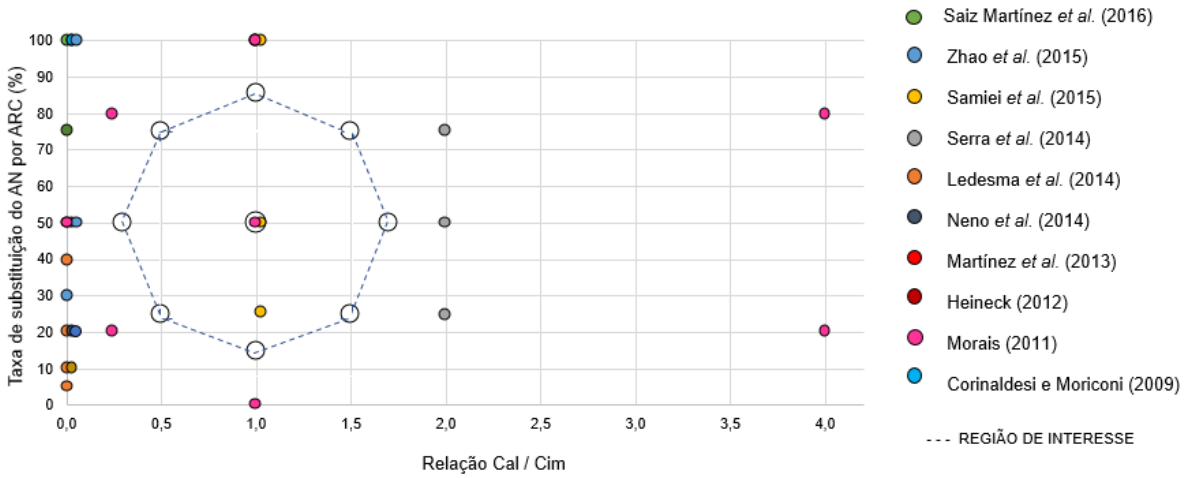
No Brasil a fração de concreto nos resíduos pode representar de 7 a 21% do RCD (JADOVSKI, 2005). Enfatizando o potencial de utilização desse resíduo, Buttler (2003, 2007), comenta que os resíduos de concreto possuem maior potencial de utilização quando comparados com outros resíduos de construção.

Atualmente, existe um maior interesse da comunidade científica em estudos com agregados reciclados a partir de compostos de cimento aplicados no concreto, desse modo, surgem lacunas para o conhecimento aprofundado das propriedades das argamassas com agregados reciclados (SAMIEI *et al.* 2015; JIMÉNEZ *et al.* 2014). Segundo Pereira *et al.* (2012) isso ocorre pelo fato da argamassa ser considerada menos nobre em relação ao concreto.

Fatores técnicos, também, contribuem para um menor número de estudos com argamassas que incorporam agregados reciclados quando comparados ao emprego do resíduo em concreto. De um modo geral, as resistências à compressão da argamassa diminuem à medida que a fração fina do agregado reciclado de concreto aumenta (ZHAO *et al.* 2015). De acordo com Neno *et al.* (2014), isso ocorre basicamente pela extrema porosidade dos materiais reciclados finos. A quantidade de argamassa aderida à fração fina do agregado reciclado de concreto é maior do que na fração grossa, reduzindo a qualidade do resíduo cimentício quando comparado ao agregado natural (JUAN e GUTIÉRREZ, 2009).

Na Figura 1.1 relacionam-se estudos realizados nos últimos 10 anos com argamassas mistas (cimento-cal) produzidas com a fração fina do agregado reciclado de concreto (ARCF) em substituição do agregado natural (AN).

Figura 1.1 - Pesquisas com uso de ARC em argamassa



Percebe-se que os níveis de observação dos pesquisadores para as variáveis cal/cimento e taxa de substituição do AN por ARCF, compreendem os intervalos de 0 a 2 e de 5 a 100%, respectivamente.

Dentre os estudos relacionados na Figura 1.1, um número maior de pesquisadores (Saiz Martínez *et al.* (2016); Zhao *et al.* (2015); Ledesma *et al.* (2014); Neno *et al.* (2014); Corinaldesi e Moriconi (2009)) utilizaram a cal em baixas quantidades combinada com o cimento na produção das argamassas, ou seja, com a relação cal/cimento abaixo de 0,5. Já as pesquisas de Heineck (2012); Martínez *et al.* (2013); Samiei *et al.* (2015) e Serra *et al.* (2014) utilizaram média (cal/cim = 1) e alta (cal/cim = 2) quantidades de cales combinadas com o cimento nas misturas, respectivamente.

O estudo de Morais (2011) diferencia-se entre os demais por avaliar as variáveis cal/cim e taxa de substituição do AN por ARCF com níveis de observação inferior e superior limitados de 0 a 4 e de 0 a 100%, respectivamente. Isso deve-se ao fato do autor utilizar a modelagem estatística para avaliar os resultados observados.

A partir dos relatos sobre a Figura 1.1, observa-se poucos estudos com emprego do ARCF em argamassas mistas com a relação cal/cimento compreendida

entre 0,5 e 1,5, evidenciado na Figura 1.1 pela área tracejada e identificada como região de interesse.

Diante dos relatos, este trabalho busca reproduzir argamassas com substituição do AN por ARCF nas porções de 25 a 75% e relação cal/cimento de 0,5 a 1,5.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da fração fina do agregado reciclado de concreto (ARCF) no comportamento de argamassas mistas para uso em revestimento.

1.2.2 Objetivos específicos

(i) Avaliar a distribuição granulométrica das argamassas com a mistura dos agregados natural e reciclado de concreto.
(ii) Avaliar o comportamento mecânico das argamassas com incorporação do ARCF utilizando o planejamento experimental com modelagem estatística.
(iii) Avaliar qualitativamente a trabalhabilidade das argamassas com ARCF.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho será estruturado em cinco capítulos. Primeiramente, o capítulo 1 (**Introdução**) busca compreender os motivos para a escolha do tema, os objetivos pretendidos e a estrutura que será adotada para a elaboração do estudo. Na sequência, o capítulo 2 (**Revisão da literatura**) será dividido em 2 subseções:

- Subseção 2.1 (Características do agregado reciclado de concreto (ARC)) apresentará um panorama das principais propriedades para caracterização do agregado reciclado de concreto.
- Subseção 2.2 (Aplicação do ARC em argamassas) comentará as características das argamassas com uso do agregado reciclado de concreto.

Em seguida, o capítulo 3 (**Metodologia**) será dividido em 3 subseções:

- Subseção 3.1 (Delineamento experimental) descreverá a técnica experimental para a formulação das argamassas, buscando avaliar a influência das variáveis de controle (fatores independentes) frente às variáveis respostas (fatores dependentes).
- Subseção 3.2 (Materiais) apresentará a estrutura para caracterizar os componentes utilizados na formulação das argamassas.
- Subseção 3.3 (Métodos de ensaios do programa experimental) descreverá os ensaios que serão realizados para avaliação das características dos ligantes, agregados e argamassas.

O capítulo 4 (**Resultados e discussões**) será dividido em 3 subseções:

- Subseção 4.1 (Caracterização dos ligantes) apresentará as características físicas, química e mineralógicas do cal e cimento utilizados nas misturas.
- Subseção 4.2 (Caracterização dos agregados) apresentará as características físicas, química e mineralógicas dos agregados natural e reciclado utilizados nas argamassas.
- Subseção 4.3 (Caracterização das argamassas) apresentará as propriedades observadas nas argamassas com uso do ARC em substituição ao AN.

Por fim, o capítulo 5 (**Considerações finais**) será dividido em duas subseções:

- Subseção 5.1 (Conclusões) apresentará uma síntese dos principais resultados observados nessa dissertação.
- Subseção 5.2 (Sugestões para trabalhos futuros) apresentará sugestões para estudos que não foram desenvolvidos nessa dissertação, mas será de utilidade para melhor compreensão sobre o tema.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO DA LITERATURA

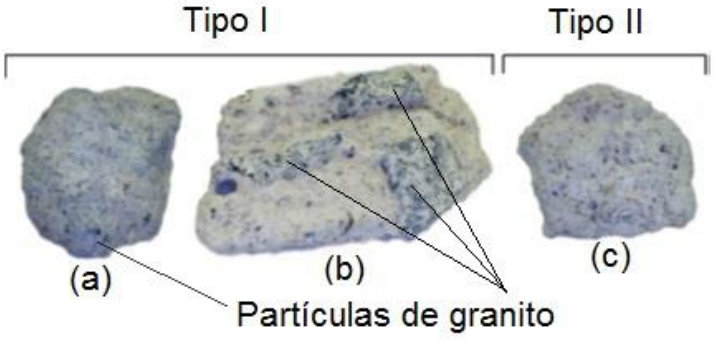
2.1 CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC)

O ARC deve compreender um mínimo de 90%, em massa, de fragmentos à base de cimento Portland e agregado natural (NBR 15116, 2005), sendo obtido principalmente por britagem e peneiramento.

Quando resíduos de concreto que frequentemente possuem composições variadas, são processados, o ARC de igual modo apresenta características variadas que se deve principalmente à argamassa e à pasta de cimento aderidas ao agregado natural.

Akbarnezhad *et al.* (2011), afirmam que a fração grossa do agregado reciclado de concreto (ARCG) pode compreender partículas de agregado graúdo natural, rodeado totalmente ou parcialmente por uma camada de argamassa e/ou pasta de cimento, designado como tipo I, nas figuras 2.1(a) e 2.1(b) ou podem ser essencialmente um pedaço de argamassa com diferentes proporções de agregados naturais de tamanho menor, designado como tipo II na figura 2.1(c).

Figura 4.1 - Diferentes tipos de ARC



Fonte: Adapdato de Akbarnezhad *et al.* (2011)

Em relação às propriedades físicas, químicas e mineralógicas, Evangelista *et al.* (2015) compararam a fração fina do agregado reciclado (ARCF) produzido a partir de concreto estrutural processado em britador tipo mandíbula e o agregado natural (AN), a partir de areia silicosa lavada.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais características observadas por Evangelista *et al.* (2015) no ARCF cujas frações menores que 2 mm apresentaram

altos teores de argamassa com pouca presença de AN, e por outro lado, as frações com maiores dimensões (d < 4 mm) apresentaram uma quantidade considerável de agregados naturais, quer isolado, quer contendo argamassa aderida.

Tabela 2.1 – Propriedades físicas, químicas e mineralógicas do ARCF

Propriedade	Característica	
	ARCF	AN
Física	Frações de 1 mm a 4 mm apresentam características semelhantes. Partículas angulares, com superfície irregular e topografia acentuada	Morfologia irregular e angular com superfície, aparentemente, compacta
Química	Presença de calcita - provenientes não só de pedra calcária natural, mas também da presença de componentes de concreto carbonatados – além de sílica e feldspato	Isento de elementos eventualmente presentes como impurezas
Mineralógica	Calcita, quartzo, gesso, feldspato de potássio e feldspato sódico foram identificados em todas as frações, juntamente com quantidades residuais de etringita e de $Ca(OH)_2$ (CH) sob a forma de portlandita	Quartzo e feldspato potássico

Fonte: Adaptado de Evangelista *et al.* (2015)

Tornar-se difícil o uso regular em compostos cimentícios do ARC em substituição ao AN pela diferença entre suas propriedades. Mesmo assim, Evangelista *et al.* (2015) enfatiza que a introdução de maiores quantidades de ARCF na produção de concreto representa uma oportunidade para a indústria da construção.

Estudos revelam (POON; SHUI, 2004; JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; AKBARNEZHAD *et al.* 2011; SILVA *et al.* 2014) que a diferença entre as propriedades do ARC e AN ocorre principalmente pela argamassa aderida à superfície do ARC podendo ser afetado significativamente pelo processo de reciclagem, qualidade do concreto original e dimensão do agregado reciclado (PEDRO *et al*. 2017).

Desse modo, reconhecer as características do ARC é importante para uniformizar a produção de compostos cimentícios com uso do agregado reciclado.

Segundo Akbarnezhad e Ong (2013), as propriedades mais importantes para avaliar a qualidade do ARC são a absorção de água, densidade e resistência à abrasão Los Angeles, o que será discutido nas seções 2.1.2 e 2.1.3 dessa dissertação.

2.1.1 Teor de ligantes no resíduo de concreto

Existe uma grande dispersão do teor de argamassa residual presente no ARC relatado na literatura, podendo variar de 23 a 55% (MEHTA; MONTEIRO, 2016), ou ainda, de 20 a 70%, na visão de Akbarnezhad *et al.* (2013b). Porém, observa-se um consenso para justificar a alta dispersão do teor de argamassa pautado no processo de produção e dimensão do agregado reciclado.

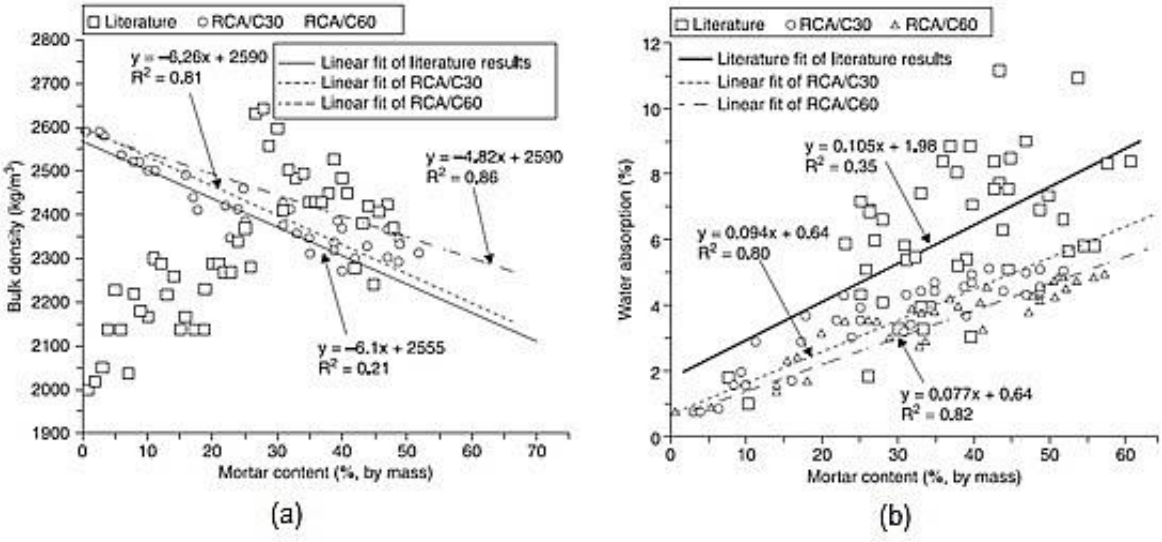
Os grãos de tamanhos menores apresentam maiores quantidades de argamassa residual (PARVIZ, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2016), sendo esse o principal motivo para a pouca utilização do ARCF, visto que conduz a uma redução da qualidade do agregado reciclado quando comparado ao agregado natural (SANCHEZ de JUAN; GUTIERREZ, 2009; AKBARNEZHAD *et al.* 2011).

A redução do teor de argamassa no ARCF é investigada, principalmente, por etapas sucessivas de esmagamento que pode reduzir os ligantes de 10 a 40% quando aplicado uma etapa adicional ao processo (AKBARNEZHAD *et al.* 2013a), e beneficiamentos adicionais por ação térmica e/ou química por agressão de ácidos (AKBARNEZHAD; ONG, 2013).

2.1.2 Densidade aparente e absorção de água

A absorção de água e a densidade aparente do ARC são normalmente consideradas inter-relacionadas, com relação inversa quase linear. Segundo Akbarnezhad e Ong (2013), isto ocorre basicamente, porque as variações em qualquer destas propriedades resultam de uma variação do teor de argamassa no ARC. Os autores demonstram nas figuras 2.2 (a) e (b), que a densidade aparente (R^2 = 0,81 e 0,86) e a absorção de água (R^2 = 0,80 e 0,82) apresentam forte correlação linear com o teor de argamassa no ARC, produzidos a partir de concreto com classe de resistência de 30 e 60 MPa, respectivamente.

Figura 2.2 - (a) Densidade aparente *versus* teor de argamassa no ARC; (b) Absorção de água *versus* teor de argamassa no ARC



Fonte: Adaptado de Akbarnezhad e Ong (2013)

Devido à presença de argamassa aderida, o ARCF tem valores de densidade inferiores ao AN (EVANGELISTA; de BRITO, 2007; CARTUXO *et al.* 2014; MEHTA; MONTEIRO, 2016). Como consequência, a absorção de água é mais elevada no ARCF do que no AN, estabelecendo uma distinção entre eles mais profunda.

Segundo Neville (2013), a absorção de água mais elevada no ARC pode ser favorável se o agregado tiver sido saturado antes da mistura, pois a água absorvida gera uma cura interna, o que diverge do estudo de Zhao *et al.* (2015). Os autores relatam que a resistência à compressão das argamassas contendo ARCF seco é sempre maior do que a argamassa feita com ACRF saturado (ZHAO *et al.* 2015).

Desse modo, nessa dissertação, priorizou-se misturar os materiais (aglomerantes e agregados) na condição seca, sendo adicionada a água de amassamento apenas no momento de preparo da argamassa. Estes procedimentos serão detalhados nas seções 3.3.3.1 e 3.3.4.2.

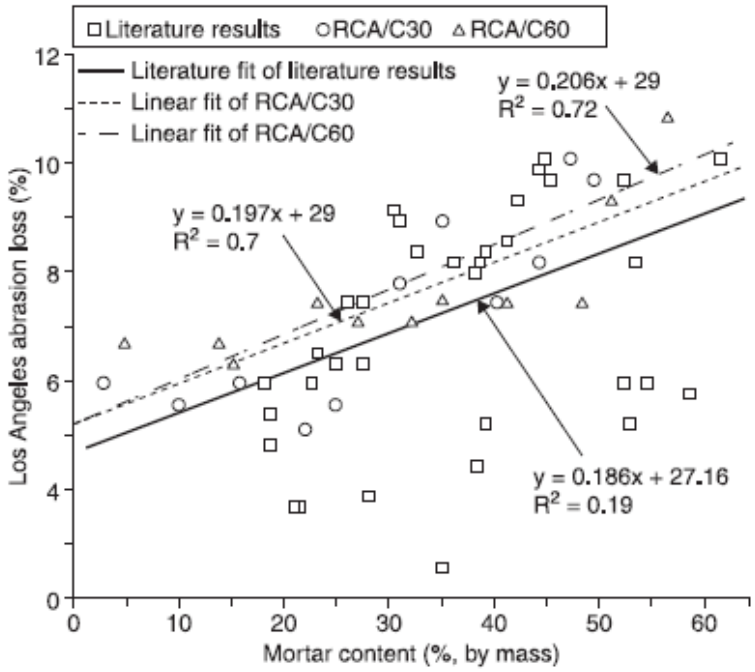
2.1.3 Resistência superficial

A resistência à abrasão Los Angeles do ARC diminui proporcionalmente com o aumento do teor de argamassa (AKBARNEZHAD *et al*. 2013a; SANCHEZ de JUAN;

GUTIERREZ, 2009), sendo a perda de massa superior a 30% que é atribuída à presença de argamassa por apresentar tenacidade tipicamente mais baixa em comparação ao AN (AKBARNEZHAD; ONG, 2013).

Observa-se na Figura 2.3 que as correlações lineares entre a perda de massa por abrasão Los Angeles e o teor de argamassa no ARC, a partir de concretos C30 e C60*, são 70 e 72%, respectivamente.

Figura 2.3 - Relação entre resistência por abrasão e teor de argamassa no ARC



Fonte: Adaptado de Akbarnezhad e Ong (2013).

2.2 APLICAÇÕES DO ARC EM ARGAMASSAS

Nessa seção 2.2 avalia-se o efeito da utilização do ARCF em argamassas, considerando que o volume dos agregados representa um percentual significativo do material utilizado na mistura.

Essa característica foi observada por Santos *et al.* (2016), ao afirmarem que o volume de agregados na argamassa compreende de 75 a 85%, além de enfatizarem que o desempenho das argamassas é afetado por características dos agregados

* As indicações C30 e C60 representam a classe de resistência à compressão dos concretos sendo 30 e 60 MPa, respectivamente.

como a granulometria e a forma dos grãos que podem afetar a trabalhabilidade, densidade aparente e resistências mecânicas, enquanto a composição mineralógica pode induzir reações químicas.

Em estudos com argamassas que empregam o ARCF, observa-se uma variabilidade na composição granulométrica do agregado reciclado, o que é justificado, normalmente, pela relação inversa entre o tamanho nominal do grão e o teor de ligante aderido ao agregado reciclado, conforme discutido na seção 2.1.

Desse modo, pesquisas recentes buscaram compreender a influência da fração fina do ARC em argamassas utilizando distribuições granulométricas com grãos entre 0-5 mm (MARTÍNEZ *et al.* 2013; NENO *et al.* 2014; MARTÍNEZ *et al.* 2016; SERRA *et al.* 2014; LEDESMA *et al.* 2014; ZHAO *et al.* 2015), 0-2 mm (HEINEK, 2012) e menor que 0,15 mm (BRAGA *et al.* 2012), com predominância do cimento como material ligante e taxas de substituição do AN por ARC entre 5 e 100%.

Ressalta-se nesses estudos que a cal foi utilizada como ligante em conjunto com o cimento, apenas, nas pesquisas de Samiei *et al.* (2015), Heinek (2012) e Serra *et al.* (2014), mesmo o aglomerante aéreo sendo bastante utilizado em argamassas de revestimento, conforme observado em pesquisas brasileiras (SALES *et al.* 2014; CAMPOS *et al.* 2015; GUACELLI *et al.* 2015; LOVATO *et al.* 2015; PIVOTTO *et al.* 2015; CARASEK *et al.* 2016), que revelaram interesse em observar a relação ligante/agregado (1:3), sendo mais usuais as proporções dos materiais 1:1:6 e 1:2:9 (cimento: cal: areia), em volume.

São demonstradas na tabela 2.2, as características físicas e a origem do AN e ARC utilizados nas pesquisas discutidas nessa seção.

Tabela 2.2 – Características dos agregados naturais e reciclados de concreto

Autores	Agregado	Fração (mm)	Densidade de massa (kg/m³)		Absorção de água (%)	Origem
			Unitária	Específica		
Martínez *et al.* 2016	AN	< 4	1560	NI	0,92	NI*
	ARC	0,063 / 4	1330	NI	6,12	Usina de reciclagem
Zhao *et al.* 2015	AN	< 5	NI	2660	1,05	Britagem rocha calcária
	ARC	< 5	NI	2540	7,54	Usina de reciclagem

Samiei *et al.* 2015	AN	< 4	NI	2620	NI	Areia de rio
	ARC	< 6	NI	2670	4,50	
Neno *et al.* 2014	AN	0,149 / 4	1433	NI	NI	Areia de rio
	ARC	0,149 / 4	842 a 1069	NI	8,49	Blocos de concreto C30-C37
Serra *et al.* 2014	AN	< 4,8	1330	NI	NI	Areia de rio
	ARC	< 4,8			NI	Britagem de argamassa em laboratório
Ledesma *et al.* 2014	AN	< 4	NI	2630	0,79	Areia de rio silicosa
	ARC	< 4	NI	2200	8,26	Usina de reciclagem – blocos de concreto
Martínez *et al.* 2013	AN	< 4,76	NI	2600	1,30	Areia natural (AN3)
	ARC	< 4,76	NI	2110	6,27	Concretos diversos
Heinek, 2012	AN	< 2	1475	NI	2,10	Areia de rio quartsoza
	ARC	< 2	1368 e 1369	NI	5,34 e 7,48	Peças de concreto com cura normal e térmica
Braga *et al.* 2012	AN	< 5	1433	NI	NI	NI
	ARC	< 0,150	842	NI	NI	Britagem em laboratório concreto C30

*NI - Não informado

Conforme mencionado anteriormente nessa seção 2.2, os estudos de Samiei *et al.* (2015), Heinek (2012) e Serra *et al.* (2014) se assemelham por utilizarem o cimento e a cal como ligantes nas formulações das argamassas com ARC, porém com divergência nas relações cal/cimento em volume, sendo os valores de 0,5; 1 e 2, respectivamente.

Samiei *et al.* (2015) compararam as propriedades de argamassas com cimento e cimento-cal, no traço 1:1:6 (cimento : cal : areia), em peso, substituindo o AN por ARC nas porções de 25%, 50% e 100%, e observaram que: (i) os agregados tiveram distribuições granulométricas diferentes, sendo o AN com tamanho de partículas predominantes em torno de 500 µm, com ausência de frações abaixo de 125 µm e acima de 6,25 mm e o ARC com grande quantidade de partículas acima de 5 mm (cerca de 70%), além de 1% de ultrafinos com partículas menores que 125 µm; (ii) nas argamassas com ARC e ligantes cimento-cal ocorreram aumentos na resistência à compressão em até 60%, na resistência à tração na flexão de forma semelhante até

a substituição de 50%, no módulo de elasticidade de 10.000 a 14.000 MPa, além de reduções na absorção de água de 0,8 $kg.m^{-2}.min^{-0.5}$ a 0,6 $kg.m^{-2}.min^{-0.5}$ e na densidade de massa no estado endurecido de 1800 kg / m³ a 1748 kg / m³, quando se aumenta a fração de ARC; (iii) nas argamassas com ligante de cimento e ARC ocorreram reduções na resistência à compressão de 25 a 15 MPa, na resistência à tração na flexão de 5,8 a 3,9 MPa, no módulo de elasticidade de 25.000 a 21.000 MPa, na densidade de massa de 2100 kg / m³ a 1950 kg / m³, além de aumento na absorção de água de 0,05 $kg.m^{-2}.min^{-0.5}$ a 0,21 $kg.m^{-2}.min^{-0.5}$, quando ocorreu a substituição do AN por ARC.

Observa-se no estudo de Samiei *et al.* (2015) que mesmo o ARC melhorando o desempenho das argamassas, as propriedades mecânicas das argamassas com AN foram superiores as argamassas com ARC.

Serra *et al.* (2014) avaliaram a substituição parcial do AN por agregado reciclado de argamassa, em novas formulações, a partir dos teores de 25%, 50% e 75%, no traço 1:2:9 (em volume), utilizando como ligantes o cimento Portland tipo CP II Z - 32 e a cal hidratada tipo CH-I. A areia reciclada foi produzida em laboratório com redução das partículas em britador tipo mandíbula seguido de apiloamento e peneiramento em malha com abertura igual a 4,8 mm.

Os autores constaram que: (i) a quantidade de água incorporada à mistura aumentava à medida que se aumentava o teor de ARC; (ii) o teor de ar incorporado e o coeficiente de capilaridade mantiveram-se praticamente inalterados no traço de referência até o traço com substituição de 50%, atingindo nesse último 3,6% e 0,013 $g/dm^2.min^{1/2}$, respectivamente. Já na argamassa com 75% de substituição o teor de ar incorporado foi de 3,8% e o coeficiente de capilaridade foi 0,07 $g/dm^2.min^{1/2}$; (iii) as densidades de massa no estado fresco e endurecido não se modificaram com a presença do agregado reciclado; (iv) a resistência à tração aumentou proporcionalmente ao acréscimo da substituição do AN por ARC (25, 50 e 75%) com valores de 1,27; 1,47 e 2,28 MPa, respectivamente; (v) as argamassas com substituição de 50% e 75% do AN por ARC aplicadas em substrato de bloco cerâmico apresentaram fissuras.

Heinek (2012) avaliou a substituição total do AN por ARC em argamassas, no traço em volume 1:1:6 (cimento : cal : areia), utilizando como ligantes o cimento Portland tipo CP II Z - 32 e a cal hidratada tipo CH-I, sendo o ARC produzido em

laboratório a partir de concretos com cura normal e térmica com redução das partículas em britador tipo mandíbula seguido de peneiramento, sendo ajustada a distribuição granulométrica de modo a reproduzir o empacotamento dos grãos do AN.

A autora constatou que: (i) a densidade no estado fresco das argamassas com ARC foram inferiores à argamassa de referência por incorporarem maiores teores de ar e demandarem maiores teores de água; (ii) o uso de agregados reciclados originou argamassas mais porosas e com índices de vazios superiores às argamassas com AN, com menor resistência mecânica e menor módulo de elasticidade dinâmico, exceto as argamassas com ARC proveniente do concreto com cura térmica, que apresentaram a maior resistência à tração na flexão e maior módulo de elasticidade dinâmico.

Martínez *et al.* (2013) avaliaram a substituição total do AN, oriundo da britagem de rocha e areia de rio, por agregados reciclados cerâmico, misto e de concreto, além de finos reciclados como a cal hidratada, fíller calcário e escória da indústria do aço em argamassas com relação ligante / agregado em 1:6, sendo a proporção dos materiais em volume igual a 1:4:2 (cimento : agregado : adição), para as formulações com agregados naturais e para as argamassas com agregados reciclados de 1:5:1.

Os autores constaram nas formulações com ARC e finos de cal hidratada quando comparadas as argamassas com AN, que: (i) as propriedades mecânicas foram adequadas para uso das argamassas em revestimento, porém com reduções nas resistências à compressão de 10,3 a 8,2 MPa (- 20,4%), à tração na flexão de 3 a 2,2 MPa (- 26,7%) e aderência de 0,51 a 0,28 MPa (- 45,1%); (ii) no estado plástico houve redução no índice de consistência de 195 a 187 mm (- 4,1%) e a retenção de água permaneceu praticamente inalterada, variando de 91,3 a 91,1%; (iii) no estado endurecido houve redução na densidade de 2086 a 1976 kg/m^3 (- 5,3 %) e aumento nas absorção de água e porosidade de 13,8 a 20,7% e 25,3 a 33,8%, respectivamente.

Observa-se nas argamassas cimento-cal com baixo teor do aglomerante aéreo (SAMIEI *et al.* 2015) que a elevação na substituição do AN por ARC, até níveis de 50%, aumentam as resistências à compressão, tração na flexão e o módulo de elasticidade, além de reduzir a absorção de água e a densidade de massa.

Já quando o volume da cal é igual ao volume do cimento nas argamassas com substituição total do AN por ARC, ocorre o inverso. O maior consumo de água e porosidade promovem uma redução nas resistências mecânicas e módulo de

elasticidade. Ressalta-se, no estudo de Heinek (2012), que o perfil granulométrico das areias natural e recicladas foram ajustados para o maior empacotamento dos grãos, além da obtenção de melhores resultados para as argamassas com ARC originado de concreto com cura térmica.

Para argamassas com elevado consumo da cal (SERRA *et al.* 2014), ou seja, relação cal/cimento igual a 2, o teor de ar incorporado e o coeficiente de capilaridade mantiveram-se praticamente inalterados no traço de referência até a mistura com substituição de 50%. Já a resistência à tração aumenta proporcionalmente com o acréscimo de ARC.

Os estudos de Zhao *et al.* (2015); Ledesma *et al.* (2014); Neno *et al.* (2014); Martínez *et al.* (2016); Braga *et al.* (2012) se assemelham por utilizarem apenas o cimento como ligante nas argamassas com ARC e relações ligante/agregado (em volume) variando de 1:3 a 1:7.

Zhao *et al.* (2015) avaliaram propriedades nos estado fresco e endurecido, além da microestrutura de argamassas com substituição parcial e total do AN (origem calcária) por ARC (composto essencialmente por argamassa e pasta de cimento), nas proporções de 10, 20, 30, 50 e 100% com relação ligante/agregado de 1:3, sendo as argamassas produzidas em três séries, em que a série I avalia a influência do estado de saturação do ARCF, a série II avalia as proporções de areia reciclada sobre as propriedades mecânicas e a série III avalia a influência de cada fração granular da areia reciclada nas propriedades das argamassas.

Os autores constaram que: (i) o abatimento das argamassas com agregados secos é sempre maior do que as argamassas produzidas com agregados saturados (independente da relação a/c), sugerindo que a absorção de água por agregados secos na argamassa é menor ou mais lenta do que a absorção determinada com procedimentos padrão; (ii) Ocorre redução da relação a/c e densidade de massa no estado fresco quando se aumenta a porcentagem de substituição do AN por ARCF, o que é devido à menor densidade do ARCF; (iii) a resistência à compressão das argamassas contendo ARCF seco é sempre maior do que a argamassas feita com ARCF saturado, o que é atribuído a uma menor zona de transição, por outro lado, ocorre uma redução na resistência à compressão das argamassas a medida que o ARC aumenta; (iv) a fração mais fina do ARC (0 / 0,63 mm) tem uma maior influência prejudicial do que as frações maiores, sendo em parte devido ao maior teor de pasta

de cimento, maior absorção de água e baixas propriedades mecânicas da fração mais fina do ARC.

Martínez *et al.* (2016) avaliaram argamassas com diferentes ARCF oriundos de processos de reciclagem de materiais cerâmico (AR-1), misto (AR-2) e de concreto (AR-3), com partículas entre 0,063 e 4 mm e distribuições granulométricas contínuas, para teores de substituição de 50, 75 e 100%, com relações ligante/agregado de 1:3 e 1:4, sendo utilizado 1% de aditivo sobre a massa do cimento para reduzir a água de amassamento mantendo a trabalhabilidade.

Os autores observaram que: (i) as argamassas com ARCF tiveram menor densidade e maior absorção de água (situadas entre 5 e 10%) quando comparadas às argamassas com AN; (ii) redução do período de trabalhabilidade pela elevada absorção de água no ARC; (iii) as resistências mecânicas das argamassas produzidas com 100% de ARC são menores em comparação com o AN; (iv) as misturas com resíduo de concreto apresentaram melhores propriedades mecânicas quando comparadas às argamassas com resíduo cerâmico e misto.

Neno *et al.* (2014) avaliaram argamassas com níveis de substituição do AN por ARC em 20, 50 e 100% (em volume), com partículas entre 0,149 e 4 mm e relação ligante/agregado de 1:4.

Os autores observaram que: (i) o teor total de água nas argamassas com 20% de ARCF foi substancialmente mais elevada do que na mistura de referência para a mesma trabalhabilidade; (ii) a densidade da argamassa fresca, como era de se esperar, diminuiu proporcionalmente com o aumento do ARCF; (iii) o aumento de 40% na capacidade de retenção de água das argamassas contendo ARCF em comparação com a mistura de referência indica uma melhoria de desempenho, uma vez que esta representa uma maior probabilidade para o ligante hidratar-se completamente, conduzindo a um ganho de resistência mecânica e de aderência; (iv) redução da absorção de água por capilaridade nas argamassas com ARC em até 25% para a substituição total em relação à argamassa de referência; (v) aumento das resistências à compressão e tração na flexão com a substituição de 100% do AN por ARCF em 35 e 45%, respectivamente; (vi) redução na resistência de aderência em aproximadamente 20% da argamassa com ARCF em relação à mistura de referência; (vii) o módulo de elasticidade superior nas argamassas com ARCF, o que indica uma maior suscetibilidade para fissurar.

Braga *et al.* (2012) avaliaram a incorporação da fração fina do ARCF (< 0,150 mm) nas proporções de 5, 10 e 15% na preparação de argamassas com relação ligante/agregado de 1:4 e consistência de 175 ± 10 mm.

Os autores constaram que: (i) as resistências mecânicas aumentaram nas argamassas com incorporação de 5, 10 e 15% do ARCF, quando comparadas à argamassa de referência, em 23, 56 e 99% para o esforço à flexão e de 38, 96 e 121% para o esforço à compressão, respectivamente; (ii) houve redução da absorção de água por capilaridade com aumento da incorporação do ARCF em 29, 40 e 44%, respectivamente; (iii) ocorreu uma relação inversa entre o consumo de água e a incorporação do ARCF, ou seja, à medida que a proporção de incorporação aumentava, menos água era necessário para dar a consistência desejada a mistura devido ao preenchimento dos vazios com as partículas muito fina do concreto (efeito de enchimento).

Ledesma *et al.* (2014) avaliaram as propriedades de argamassas com substituição (5, 10, 20 e 40%) de areia siliciosa natural por ARCF produzidos a partir de cubos de concreto, com diâmetro de partículas menores que 4 mm e distribuições granulométricas distintas, na proporção ligante/agregado de 1:7, em volume.

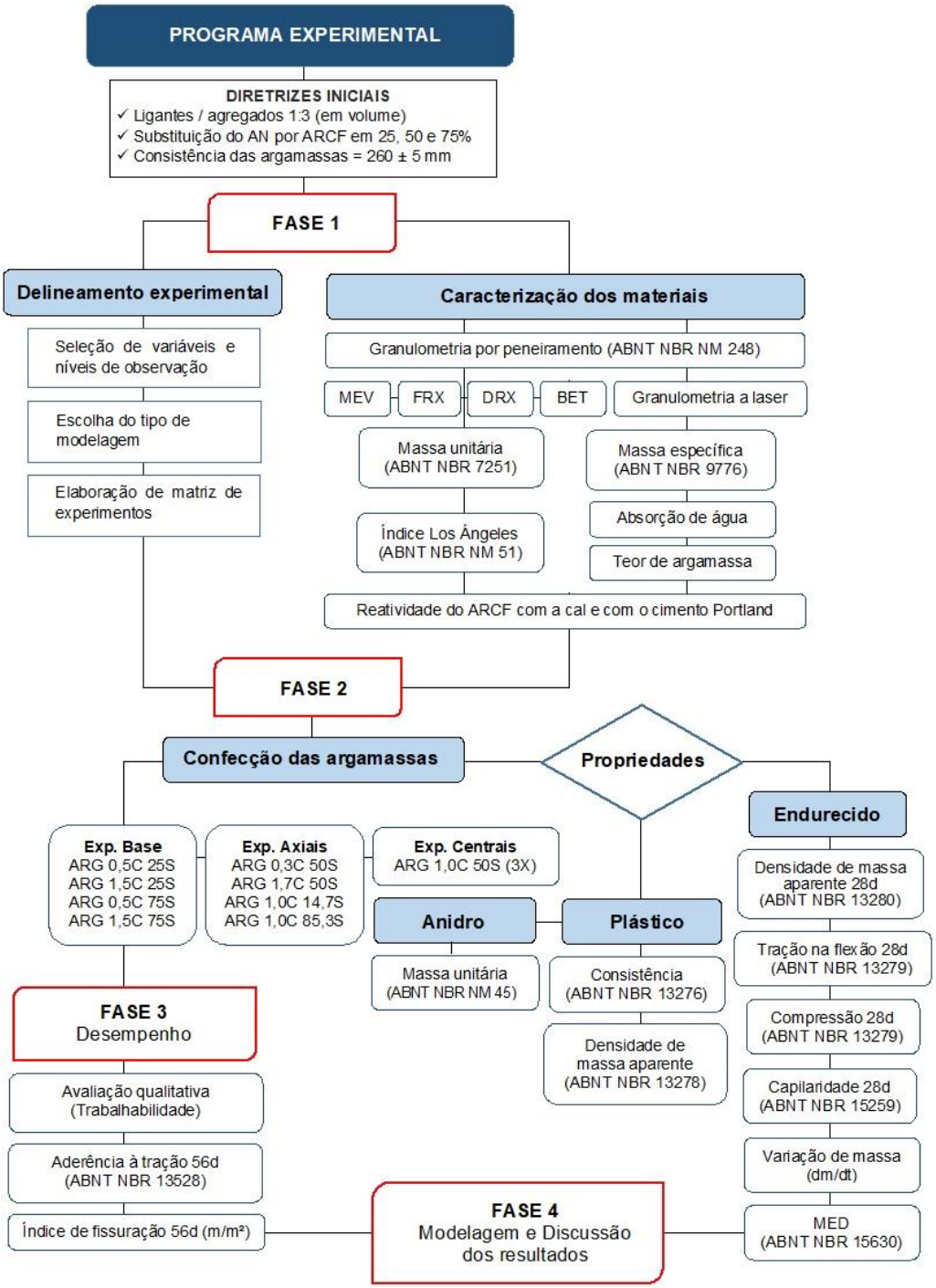
Os autores constaram que: (i) a densidade média das argamassas nos estados fresco e endurecido diminui com o aumento da taxa de substituição do AN por ARCF, devido a menor densidade seca do ARCF quando comparado ao AN; (ii) a resistência de aderência e absorção de água obteve ordem de grandeza semelhante à argamassa de referência, porém a permeabilidade à vapor de água diminuiu pela metade mesmo com baixos percentuais de substituição, o que pode ser um limitante para o uso da argamassa com ARCF em revestimento externo; (iii) a argamassa com relação de substituição do AN por ARCF em 40%, em volume, é uma alternativa viável para argamassa de assentamento em alvenaria com uso interno.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse estudo foi elaborado um programa experimental, conforme apresentado na figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxo de fases do programa experimental



O estudo foi dividido em quatro fases.

A fase 1 compreendeu duas partes distintas, sendo realizado inicialmente o delineamento experimental que foi uma etapa de planejamento essencial para atingir os objetivos do estudo. A área de observação foi definida através da seleção das variáveis e níveis de observações finalizando com a elaboração da matriz de experimentos. Na sequência, foram realizadas a seleção e a caracterização dos materiais.

Na fase 2 foram preparadas e caracterizadas as argamassas no estado anidro, além das avaliações nos estados fresco e endurecido.

Na fase 3 foi avaliado o desempenho das argamassas.

Por fim, na fase 4 realizou-se a modelagem estatística e discutiram-se os resultados.

3.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental é uma técnica em que o pesquisador pode determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um processo (CALADO; MONTGOMERY, 2003), podendo identificar os principais efeitos e as interações entre as variáveis do processo utilizando um número reduzido de experimentos.

Referindo-se à fabricação de materiais de construção à base de cimento, Pelisser *et al.* (2006), comentam que é praticamente obrigatório a modelagem numérica de misturas experimentais, a fim de obter resultados otimizados, embora Alyamac *et al.* (2017) reconheçam o uso limitado das técnicas de otimização de misturas com modelagem estatística na indústria do concreto.

Também valorizando a investigação sistemática de experimentos com análise estatística, Sutherland *et al.* (2017) mencionam que a técnica é muito poderosa por representar claramente as interações fatoriais de forma gráfica em qualquer situação em que vários parâmetros afetam a resposta medida. Nesse caso os autores referem-se à visualização dos resultados pelo Método de Superfície de Respostas (MSR).

O MSR é um método para a modelagem e otimização de diferentes processos de forma econômica e eficiente (GHANBARI *et al.* 2017), visto que essa técnica

estatística é utilizada para projetar experimentos, construir modelos, avaliar os efeitos de vários fatores e pesquisar condições ótimas para respostas desejáveis (KIM, 2016).

Nesse estudo o delineamento experimental foi realizado em três passos, a seguir:

a) Seleção de variáveis e níveis de observação;
b) Escolha do tipo de modelagem; e
c) Elaboração de matriz de experimentos.

Conforme discutido na seção 2.2 dessa dissertação, as propriedades das argamassas com ARC modificam de acordo com características específicas do agregado reciclado e parâmetros de mistura dos materiais.

Assim, nesse estudo, foram analisadas duas variáveis de controle: (i) a relação entre os ligantes cal e cimento (Cal/Cim), na busca de encontrar a menor quantidade de água e material fino, capazes de plastificar as argamassas para a consistência de 260 ± 5 mm, e (ii) a taxa de substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado de concreto (TS), buscando compreender o comportamento da argamassa com uso do ARC. A fração granulométrica do AN e ARC foram padronizadas para reduzir a variabilidade nos resultados, o que será discutido na seção 3.2.1, desse estudo.

Na sequência, selecionou-se seis variáveis respostas: (i) coeficiente de capilaridade, (ii) resistência à compressão, (iii) resistência à tração, (iv) módulo de elasticidade dinâmico, (v) resistência de aderência e (vi) índice de fissuração, buscando avaliar a influência das variáveis de controle sobre as variáveis respostas.

A organização experimental deu-se a partir de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) que permite estimar os efeitos lineares e quadráticos das variáveis e suas interações, sendo o núcleo formado por um planejamento fatorial completo 2^K (pontos base), somando-se pontos axiais (2K) que permitem estimar os efeitos de segunda ordem das variáveis e o ponto central (PC) que permite estimar a variância experimental das respostas.

Desse modo a quantidade de experimentos do DCCR foi definida pela Equação 3.1:

$$NE = 2^K + 2K + PC \quad (3.1)$$

Onde:

NE = número de experimentos;
K = número de varáveis de controle ou fatores independentes; e
PC = número de ensaios no ponto central.

Também se definiu no DCCR, o número de ensaios no ponto central que podem fornecer informações úteis sobre o comportamento das respostas entre os níveis atribuídos aos fatores, além de avaliar a qualidade na repetibilidade do processo (RODRIGUES; IEMMA, 2014) e a distância *α* a partir do centro do planejamento até os pontos axiais.

Calado e Montgomery (2003) esclarece que o parâmetro *α* torna o DCCR rotacionável, ou seja, a variância do valor previsto para a resposta é a mesma em todos os pontos das variáveis independentes, desde que a região de interesse seja esférica permitindo que todos os pontos do planejamento fatorial e axial fiquem sobre uma esfera de raio $K^{1/2}$.

Assim, os níveis (± α) nos pontos axiais foram definidos, nesse estudo, pela Equação 3.2:

$$\alpha = (2^K)^{¼} \quad (3.2)$$

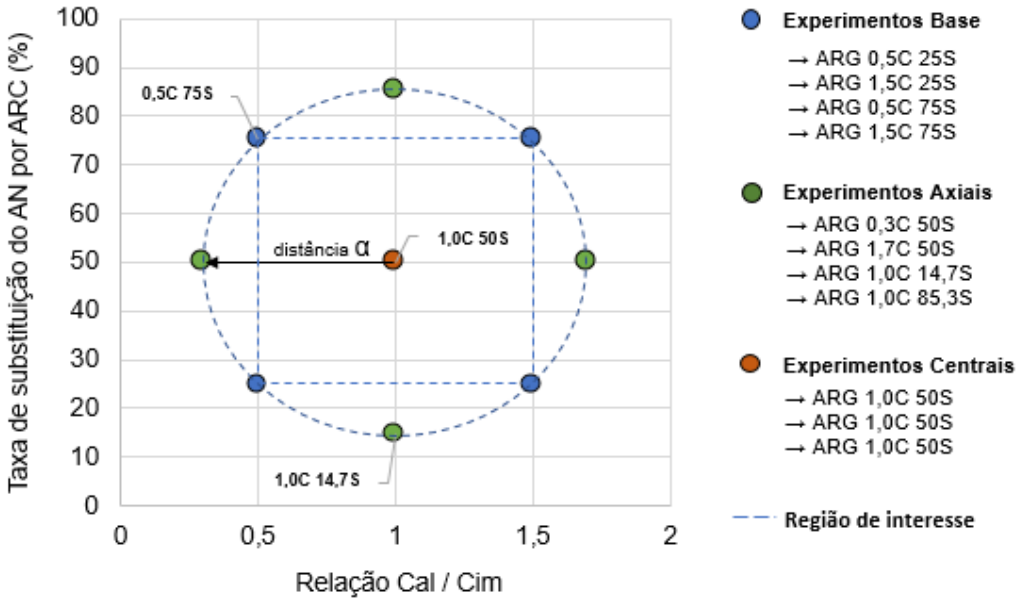
Onde:

α = nível; e

K = número de varáveis de controle ou fatores independentes.

Nesse estudo foram adotados 3 ensaios no ponto central, totalizando 11 experimentos, sendo 9 argamassas com formulações diferentes, conforme demonstrado na figura 3.2. Foi fixada a relação ligante / agregado de 1:3, em volume.

Figura 3.2 - Pontos experimentais do DCCR



Depois de definido o intervalo desejado de valores para as variáveis de controle ou fatores independentes, estes foram codificados como ± 1 para os pontos base, 0 para os pontos centrais, e ± *α* para os pontos axiais.

Na tabela 3.1, observa-se os valores dos níveis que foram utilizados para os fatores independentes selecionados na experimentação das argamassas, sendo o experimento central definido pelo traço em volume 1 : 1 : 6 (cimento : cal : areia).

Tabela 3.1 – Níveis utilizados no DCCR para produção de argamassas

Variáveis	Níveis				
	-1,41 (-α)	-1	0	+1	+1,41 (-α)
Cal / Cim (v/v)	0,3	0,5	1	1,5	1,7
TS (%)*	14,7	25	50	75	85,3

*TS: Taxa de substituição do AN por ARCF

A partir dos níveis selecionados, preparou-se a matriz de experimentos, demostrada na tabela 3.2, que foi utilizada para a formulação das argamassas no laboratório. Os experimentos base 1, 2, 3 e 4 que foram identificados como as argamassas 0,5C 25S; 1,5C 25S; 0,5C 75S e 1,5C 75S, respectivamente, avaliaram as variáveis independentes nos níveis inferior e superior, em relação ao ensaio central.

Tabela 3.2 – Matriz dos experimentos

Experimento		Codificação		Valores reais	
Nº	Identificação	X_1	X_2	Cal / Cim	TS
1	0,5C 25S	-1	-1	0,5	25
2	1,5C 25S	+1	-1	1,5	25
3	0,5C 75S	-1	+1	0,5	75
4	1,5C 75S	+1	+1	1,5	75
5	0,3C 50S	-1,41	0	0,3	50
6	1,7C 50S	+1,41	0	1,7	50
7	1,0C 14,7S	0	-1,41	1	14,7
8	1,0C 85,3S	0	+1,41	1	85,3
9	1,0C 50S	0	0	1	50
10	1,0C 50S	0	0	1	50
11	1,0C 50S	0	0	1	50

Os experimentos axiais 5, 6, 7 e 8 que foram identificados como as argamassas 0,3C 50S; 1,7C 50S; 1,0C 14,7S e 1,0C 85,3S, respectivamente, avaliaram as variáveis de controle nos pontos ± α. Já os ensaios no ponto central que visualizam a qualidade na repetibilidade do processo, foram observados pelos experimentos 9, 10 e 11, sendo identificada pela argamassa 1,0C 50S.

Dessa forma, esse estudo avaliou 5 traços diferentes com substituição parcial do AN por ARCF, sendo as proporções em volume (1 : 0,5 : 4,5) e (1 : 1,5 : 7,5) representando os limites inferior e superior dos experimentos base, respectivamente. Já os traços (1: 0,3 : 3,9) e (1 : 1,7 : 8,1), representaram os limites inferior e superior dos ensaios axiais. E o traço (1:1:6) que foi repetido 3 vezes, representaram o ponto central.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Cimento

Utilizou-se nesse estudo o cimento Portland composto com adição de pozolana (CP II Z – 32), fabricado pela Elizabeth Cimentos, cujas propriedades químicas, físicas e mecânicas são apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 – Composição química do cimento Portland CP II - Z - 32

Ensaios	NBR	Unidade	Resultados	Especificações da NBR 11578/97
PF – Perda ao Fogo	NM 18/12	%	5,97	≤ 6,50
RI – Resíduo Insolúvel	NM 15/12	%	8,95	≤ 16,0
SO3 – Anidrido Sulfúrico	NBR 14656/01	%	3,02	Não aplicável
MgO – Óxido de Magnésio	NBR 14656/01	%	3,96	≤ 6,50

Fonte: Elizabeth Cimentos[1]

Tabela 3.4 – Propriedades física e mecânica do cimento Portland CP II - Z - 32

Ensaios	NBR	Unidade	Resultados	Especificações da NBR 11578/97
Finura peneira 0,075 mm (# 200)	12826/14	%	2,5	≤ 12,0
Finura peneira 0,044 mm (# 325)	12826/14	%	8,8	Não aplicável
Área específica (Blaine)	16372/15	cm^2 / g	4240	≥ 2600
Área superficial (BET)	-	m^2 /g	1,12	Não aplicável
Massa específica	NM 23/01	g / cm^3	3,06	Não aplicável
Massa unitária	NM 45/06	g / cm^3	0,91	Não aplicável
Início de Pega	NM 65/03	h : min	02 : 25	≥ 1h
Fim de Pega	NM 65/03	h : min	03 : 25	≤ 10 h
Expansibilidade a Quente	11582/12	mm	0,10	≤ 5
Resistência à compressão (7 d)	7215/97	MPa	29,8	Não aplicável
Resistência à compressão (28 d)	7215/97	MPa	36,2	Não aplicável

Fonte: Elizabeth Cimentos[2]

[1, 2] Dados fornecidos pelo fabricante referente ao boletim de análise do cimento realizado em dezembro/2015, com exceção da área superficial (BET) e massa unitária que foi realizada a partir da ABNT NBR NM 45 (2006).

3.2.2 Cal

A cal hidratada (tipo CH I), fabricado pela IMAP, também foi utilizada nessa dissertação com material ligante. As propriedades químicas e físicas da cal hidratada são apresentadas nas Tabelas 3.5.

Tabela 3.5 – Propriedades química e física da cal hidratada

Caracterização química			
Ensaios		**Resultados (%)**	**Especificações da NBR 7175**
Anidrido Carbônico		2,23 CO_2	≤ 7,0 %
Anidrido Sulfúrico		0,01 SO_3	Não aplicável
Óxido de Cálcio total		70,47 CaO	Não aplicável
Óxido de Magnésio		1,51 MgO	Não aplicável
Cao + MgO não hidratados (calculado)		4,5	≤ 10,0 %
Óxidos totais na base de não voláteis		94,6	≥ 90,0 %
Caracterização física			
Ensaios		**Resultados**	**Especificações da NBR 7175**
Umidade (%)		0,89	Não aplicável
Perda ao fogo (1000 ± 50 ºC) (%)		23,90	Não aplicável
Finura (% retida acumulada)	#30 (0,600 mm)	0,1	≤ 0,5 %
	#200 (0,075 (mm)	5,1	≤ 10,0 %
Área superficial (m² /g)		3,69	BET
Massa específica (g/cm³)		2,33	NBR NM 23/01
Massa unitária (g/cm³)		0,49	NBR NM 45/06

Fonte: IMAP Indústria e Comércio de Calcário[3]

3.2.3 Agregados natural e reciclado de concreto

A areia natural utilizada nesse estudo foi predominantemente quartzosa, extraída de rio e adquirida em um estabelecimento comercial na cidade do Natal/RN.

[3] Dados fornecidos pelo fabricante referente ao relatório de análise da cal realizado em março/2015, com exceção da área superficial (BET), massa específica e massa unitária que foi aferida de acordo com a NBR NM 23 (2001) e NBR NM 46 (2006), respectivamente.

Já o agregado reciclado de concreto (ARCF) foi cedido por uma empresa Construtora, atuante no mercado imobiliário de Natal/RN, que realiza o beneficiamento dos resíduos sólidos oriundo de concreto, a partir de um britador tipo mandíbula no próprio canteiro de obras.

O processo de reciclagem do ARC, ilustrado nas Figuras 3.3 (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g), inicia-se com a coleta e acondicionamento das sobras de materiais a base de cimento. Na sequência ocorre uma fragmentação primária (manual) seguido da deposição dos fragmentos no britador, iniciando a fragmentação secundária (mecânica) que produz por peneiramento uma fração grossa (ARCG) e outra fração fina (ARCF) com dimensões de partículas maiores e menores do que 4,8 mm, respectivamente.

Figura 3.3 - Beneficiamento do resíduo de concreto no canteiro de obras – (a) acondicionamento e fragmentação primária, (b) fragmentação secundária, (c) britador tipo mandíbula, (d), (e), (f) e (g) separação de frações do agregado reciclado

Nesse estudo, utilizou-se apenas a fração fina (com d < 4,8 mm) do agregado reciclado de concreto, sendo o aspecto visual do ARCF ilustrado na Figura 3.3 (f).

3.2.4 Água

A água utilizada no preparo das argamassas foi fornecida pela Concessionária de água local.

3.3 MÉTODOS DE ENSAIOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.3.1 Caracterização dos ligantes

As propriedades físicas, químicas e mecânicas dos ligantes (Cimento CP II Z e Cal hidratada CH I), utilizados nessa dissertação, foram apresentadas nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5, visto que essas informações foram cedidas pelos fabricantes Elizabeth Cimentos e IMAP Indústria e Comércio de Calcário, conforme mencionado nas seções 3.2.1 e 3.2.2. Também realizou-se na caracterização dos ligantes a avaliação mineralógica e a distribuição granulométrica.

Em relação à caracterização mineralógica do cimento e da cal utilizou-se a técnica de Difração de Raios-X (DRX), em um difratômetro Shimadzu DRX 6000. A interpretação qualitativa do espectro para identificação das fases cristalinas foi efetuada por comparação com padrões contidos na base de dados PDF2 do ICDD – International Center for Diffraction Data (2003).

Quanto à distribuição granulométrica a laser utilizou-se um granulômetro de difração a laser do tipo CILAS (modelo 920L), sendo a água utilizada como fluido de circulação sem nenhum tipo de agente dispersante. A faixa granulométrica adotada no equipamento foi de 0,30 μm – 400 μm / 30 Classes, ultrassom 60s e concentração 47.

3.3.2 Coleta e caracterização dos agregados

O agregado natural foi adquirido em estabelecimento comercial local que comercializa o produto em sacos de nylon.

Em relação ao agregado reciclado de concreto, coletaram-se três amostras da fração fina com volume de 40 litros, cada, no canteiro de obras de uma empresa

Construtora atuante em Natal/RN. O ARCF foi oriundo de construção em que o sistema construtivo adotado foi a alvenaria estrutural, formada por 3 torres de 8 pavimentos, cada, e área construída de 3000 metros quadrados.

Com intuito de observar a variabilidade entre as amostras, coletou-se o material em diferentes momentos da execução do empreendimento, sendo as amostras identificadas como ARCF 1, ARCF 2 e ARCF 3, coletadas nas fases de fundações, elevação da alvenaria e acabamento, respectivamente.

Os agregados naturais e reciclados de concreto foram caracterizados nessa dissertação quanto às suas propriedades físicas e químicas, além de avaliação microestrutural, conforme métodos apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Ensaios de caracterização dos agregados miúdo natural e reciclado de concreto

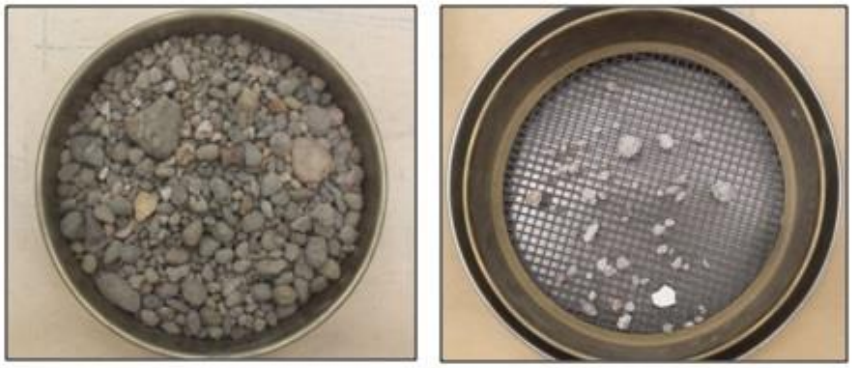
Dimensão	Avaliação	Método	Código Normativo
Agregados (> 4,75 mm)	Teor de argamassa aderida	Análise visual	-
Agregados (< 4,75 mm)	Distribuição granulométrica	Peneiramento	NBR NM 248:2003
	Teor de argamassa aderida	Aquecimento seguido de dissolução HCl	-
	Massa específica	Chapman	NBR 9776/1988
	Massa unitária	Recipiente cilíndrico com volume conhecido	NBR NM 45:2006
	Absorção de água	Imersão dos grãos por 24 h	-
	Índice Los Angeles	Desgaste à abrasão	NBR NM 51:2001
Finos dos agregados (< 0,15 mm)	Distribuição granulométrica	Laser	-
	Área superficial	BET	-
	Análise microscópica	MEV	-
	Análise química	FRX	-
	Análise mineralógica	DRX	-
	Índice de atividade pozolânica	Resistência à compressão	NBR 5751:2015 NBR 5752:2014

3.3.2.1 Granulometria dos agregados por peneiramento e a laser

Inicialmente, os agregados natural e reciclado foram secos em estufa a 105 ºC, por 24 horas, e após resfriamento foram acondicionados em recipientes plásticos com tampa.

Posteriormente, realizou-se o peneiramento das amostras para remover os grãos maiores que 4,75 mm, conforme apresentado nas Figuras 3.4 (a) e (b).

Figura 3.4 - Agregados retidos na peneira de malha 4,75 mm



(a) Grãos de AN > 4,75 mm (b) Grãos de ARC > 4,75 mm

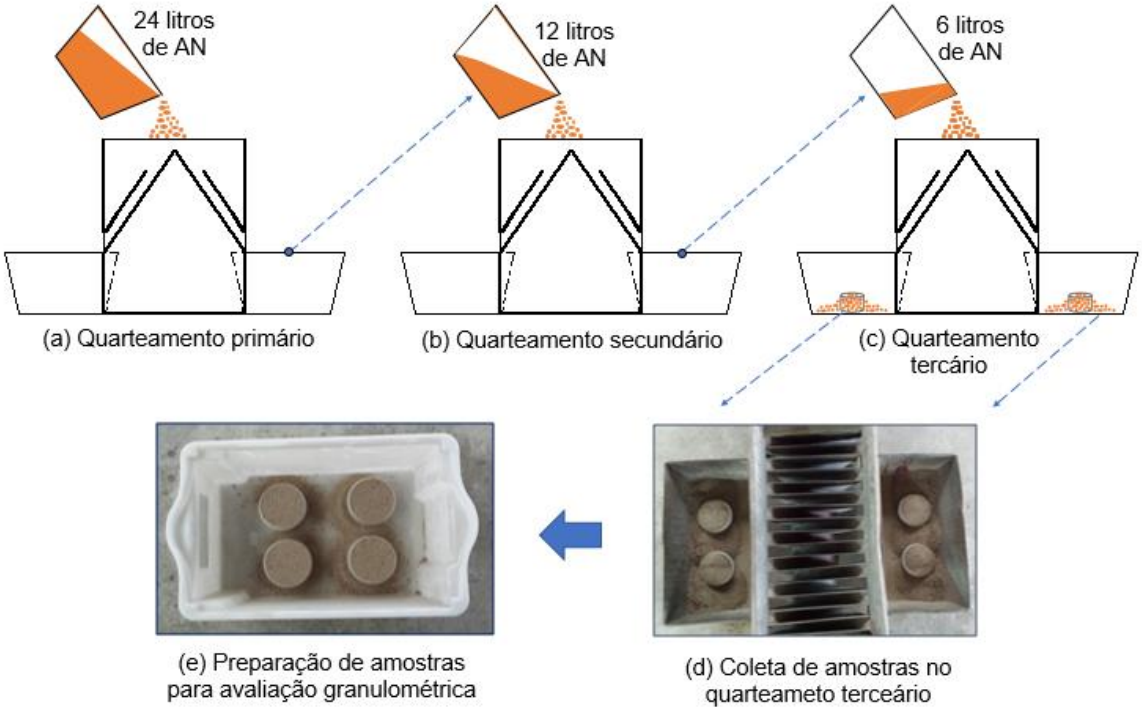
Nessa dissertação, buscou-se reduzir a variabilidade no comportamento das argamassas nos estados plástico e endurecidos, por influência da distribuição dos grãos das areias natural e reciclada de concreto.

Desse modo, padronizou-se o perfil granulométrico dos agregados miúdo em todas as formulações produzidas nesse estudo, como segue:

a) Inicialmente, reduziu-se uma amostra de 24 litros através de um quateamento primário;
b) A partir de uma amostra de 12 litros oriunda do quarteamento primário, realizou-se o quarteamento secundário; e
c) Com uma amostra de 6 litros, realizou-se o quarteamento terciário sendo coletadas quatro amostras em recipiente plástico com volume de 0,4 litros, cada, para a caracterização granulométrica do agregado.

O procedimento de redução das amostras por quarteamentos sucessivos é ilustrado nas Figuras 3.5 (a), (b), (c), (d) e (e).

Figura 3.5 - Redução de amostra do agregado miúdo natural por quarteamento



As quatro amostras do agregado natural foram identificadas como AN 1, AN 2, AN 3 e AN 4, sendo realizada a separação dos grãos na sequência de peneiras com malhas de 2,36; 1,18; 0,6; 0,3, 0,15 e 0,075 mm, seguindo as prescrições da ABNT NBR NM 248:2003.

Finalmente, padronizou-se o perfil granulométrico da areia natural através da média entre os percentuais passantes acumulados das quatros amostras coletas no quarteamento terciário.

Adotou-se para as três amostras coletadas do ARCF, o mesmo procedimento de padronização do perfil granulométrico do agregado natural, demonstrado nas Figuras 3.5 (a), (b), (c), (d) e (e).

De igual modo aos ligantes, avaliou-se a distribuição granulométrica dos finos passantes na peneira de malha 0,075 mm relativos aos agregados natural e reciclados a partir de um granulômetro de difração a laser do tipo CILAS (modelo 920L), descrito na seção 3.3.1 dessa dissertação.

3.3.2.2 Teor de argamassa aderido ao ARCF

Para avaliar o teor de argamassa existente no agregado reciclado de concreto, utilizou-se um método qualitativo que foi a inspeção visual a partir de amostras da fração grossa do ARC (> 4,75 mm), já descrito nessa seção 3.3.2 e outro método quantitativo que foi a dissolução em ácido.

Como não existe um método padrão para medir o teor de argamassa em resíduos de concreto, adaptou-se um método combinado de tratamento térmico com dissolução em ácido clorídrico, como segue:

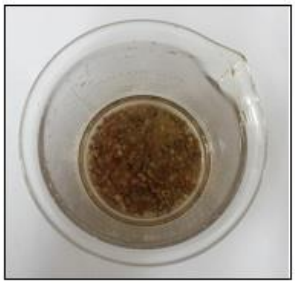
a) Inicialmente, secou-se 20 gramas do ARC com grãos de dimensões equivalentes a 2,36 mm, em estufa a 105 ^{o}C, por 24 horas;
b) Na sequência, aferiu-se a massa inicial (m_1) de 10 gramas do ARC para aquecimento em forno mufla digital, até a temperatura de 500 ^{o}C, por 1 hora;
c) Imediatamente, ao retirar o ARC da Mufla, depositou-se o material em um béquer contendo água destilada a 10 ^{o}C, procedendo com agitação manual por 2 minutos;
d) Posteriormente, drenou-se o excesso da água destilada e adicionou-se ao béquer, 40 ml de solução 1 HCl : 2 H_2O, procedendo com a agitação mecânica por 30 minutos;
e) Drenou-se a solução ácida em um funil com papel filtro para aferição de finos inertes, sendo a massa do papel filtro seco aferida previamente; e
f) Ao final, secaram-se o ARC resultante da ação térmica combinada com dissolução de ácido clorídrico e o filtro de papel drenante, em estufa a 105 ^{o}C, por 24 horas, aferindo-se a massa de grãos (m_2) e a massa de finos (m_3), respectivamente.

Demonstra-se nas Figuras 3.6 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) e (h) as etapas da ação combinada entre o tratamento térmico e a dissolução em ácido clorídrico na amostra fina de ARC.

Figura 3.6 - Sequência do procedimento para avaliação do teor de argamassa na fração fina de ARCF

(a) Amostra do ARC (# 2,36 mm)

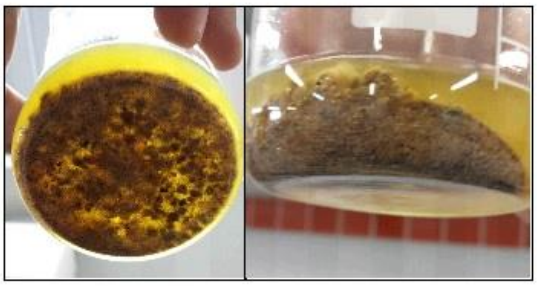
(b) Amostra do ARC (# 2,36 mm) inserido na Mufla



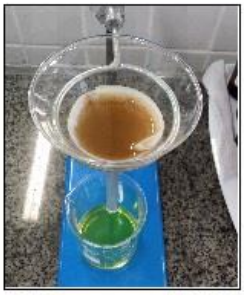
(c) Adição de água destilada no ARC

(d) ARC submerso em água

(e) ARC após drenagem da água destilada



(f) e (g) ARC submerso na solução 1HCl : 2 H_2O



(h) Drenagem da solução 1 HCl : 2 H_2O em filtro de papel

O teor de argamassa foi calculado utilizando a Equação 3.3, sendo testadas 3 amostras para obter o valor médio.

$$M_{arg} = \frac{m1-(m_2+m_3)}{m_1}\ x\ 100 \qquad (3.3)$$

Onde:

M_{arg} = teor de argamassa (%);

m_1 = massa inicial da amostra (g);

m_2 = massa de grãos após ação térmica e ataque químico (g); e

m_3 = massa de finos retido no filtro de papel (g).

3.3.2.3 Absorção de água por imersão

Para analisar a absorção de água nos agregados natural e reciclado, submergiu-se uma amostra de 500 gramas em água por 48 horas.

Em seguida, utilizando uma bomba à vácuo, retirou-se a água superficial da amostra, aferindo-se a massa úmida (*mu*). Na sequência, secou-se a amostra em estufa, a 105 ºC, por 24 horas, aferindo-se a massa seca (*ms*).

A absorção de água por imersão dos agregados foi calculada utilizando a Equação 3.4:

$$A = \frac{(mu - ms)}{ms}\ x\ 100 \qquad (3.4)$$

Onde:

A = absorção de água dos agregados (%);

mu = massa úmida (g); e

ms = massa seca (g).

3.3.2.4 Índice de abrasão Los Ángeles

O ensaio de desgaste por abrasão Los Ángeles foi realizado apenas nas amostras de ARCF, a partir de 4000 gramas do material com dimensão máxima de 2,36 mm. Utilizou-se 5 esferas como carga abrasiva sobre o ARCF durante 500 rotações do tambor a velocidade de 30 rpm.

3.3.2.5 Área superficial BET

Avaliou-se a finura dos ligantes (cimento e cal) e ARCF (< 0,075 mm) por adsorção física do nitrogênio sobre os grãos da amostra através da técnica do BET, obtendo-se a área superficial que corresponde a cobertura do material adsorvente pela monocamada do gás. As análises foram realizadas no equipamento ASAP 2020 V3.04 G.

3.3.2.6 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia foi utilizada para avaliação da morfologia, textura superficial e análise química dos agregados natural e reciclado de concreto com dimensões menores que 0,15 mm, sendo as observações realizadas com níveis de ampliação variando entre 100 a 1000 vezes. Utilizou-se o MEV SSX 550 Shimadzu com EDS Oxiford acoplado.

3.3.2.7 Análise química por Fluorescência de Raios-X (FRX)

A avaliação química dos agregados foi realizada pela técnica da Fluorescência de Raios-X, a partir de grãos retidos na peneira de malha 0,30 mm e passantes na malha 0,075 mm para os agregados natural e reciclados, respectivamente. Utilizou-se o espectrômetro da marca Shimadzu, modelo EDX-720.

3.3.2.8 Análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX)

A análise mineralógica por meio da técnica de Difração de Raios-X, resultou da exposição da amostra à radiação Ka de um ânodo de cobre (I = 1,5405 Å), 40 kV e 30 mA, com a velocidade do goniômetro de 0,02° 2θ por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e recolhidos de 5 a 75º 2θ.

3.3.2.9 Índice de Reatividade

Avaliou-se a reatividade do ARCF (< 0,075 mm) com a cal e com o cimento Portland (CP II - F - 32) através do comparativo entre as resistências à compressão aos 7 e 28 dias, respectivamente. As argamassas foram produzidas conforme prescrição das normas NBR 5751:2015 e 5752:2014.

3.3.3 Procedimentos no estado anidro

3.3.3.1 Mistura seca dos materiais constituintes da argamassa

A fim de reduzir a variabilidade nas propriedades das argamassas nos estados plástico e endurecido, por influência do processo de mistura entre os materiais constituintes, optou-se por realizar a mistura dos ligantes e agregados na condição seca, conforme descrito:

a) Depositou-se em uma bandeja, limpa previamente, os grãos de AN e ARCF retidos nas peneiras de malha 2,36; 1,18; 0,60; 0,30; 0,15; 0,075 e menor que 0,075 mm, de acordo com perfil granulométrico padronizado;
b) Na sequência, depositou-se o cimento e a cal na bandeja já contendo os agregados natural e reciclado de concreto;
c) Utilizou-se uma espátula metálica para movimentar os agregados sobre os ligantes até obter uma mistura homogênea; e
d) Posteriormente, acondicionou-se as misturas secas em recipientes plásticos identificados com a massa da amostra e número do experimento.

Para a realização de todos os ensaios dessa dissertação, preparou-se ao total 247 kg de argamassa seca, dos quais: 64 kg foram para os ensaios de granulometria, densidade de massa aparente e índice de consistência; 48 kg foram para a confecção dos corpos de prova destinados aos ensaios no estado endurecido; e 135 kg para a confecção dos painéis de revestimento aplicados sobre uma parede em bloco de concreto.

Demonstra-se na Figura 3.7 o procedimento de misturas dos materiais secos e as análises realizadas com a quantidade de argamassa seca produzida.

Figura 3.7 - Procedimento de misturas dos materiais secos e quantidade de argamassa seca produzida por agrupamento de análises

Indicação	Análises	Quantidade (kg)
(a), (b) e (c) Mistura seca dos materiais e acondicionamento da argamassa ARG 1,5 C 25S para ensaios nos estados anidro e plástico	Granulometria, densidade de massa aparente e índice de consistência	64
(d), (e), (f), (g), (h) e (i) Mistura seca dos materiais e acondicionamento das argamassas com ARC para ensaios nos estados plástico e endurecido	Densidade de massa aparente, módulo de elasticidade dinâmico, resistências à tração na flexão e compressão, absorção de água por capilaridade e índice de vazios	48
(j) e (l) Mistura seca dos materiais e acondicionamento das argamassas com ARC e de referência para análise de desempenho	Índice de fissuração e resistência de aderência	135
	Total de argamassa (kg)	247

As argamassas foram produzidas a partir da relação ligante / agregado (1/3), em volume, com substituição parcial do AN por ARCF, nas porções de 14 a 85%, e relação cal / cimento variando de 0,3 a 1,7.

Ilustra-se na Tabela 3.7 os consumos dos materiais constituintes das argamassas.

Tabela 3.7 – Consumo dos materiais constituintes das argamassas

Experimento	Indicação	Consumo kg / m³				a/l	a/c
		Cimento	Cal	AN	ARCF		
Pontos Base	ARG 0,5C 25S	228,4	61,5	1194,6	324,8	1,29	1,64
	ARG 1,5 C 25S	196,7	158,9	1714,4	466,1	1,52	2,75
	ARG 0,5C 75S	323,8	87,2	1693,2	460,3	1,33	1,69
	ARG 1,5C 75S	196,7	158,9	1714,4	466,1	1,55	2,80
Pontos Axiais	ARG 0,3C 50 S	386,9	62,5	1168,9	953,4	1,15	1,34
	ARG 1,7C 50S	189,9	173,9	1191,8	972,0	1,47	2,82
	ARG 1,0C 14,7S	240,8	129,7	1909,8	268,4	1,42	2,18
	ARG 1,0C 85,3S	270,4	145,6	369,6	1749,1	1,31	2,02
Ponto Central	ARG 1,0C 50S	254,8	137,2	1184,3	965,9	1,38	2,12
Referência	ARG 0,3C	357,9	57,8	2162,7	0,0	1,19	1,38
	ARG 0,5C	311,6	83,9	2172,7	0,0	1,27	1,61
	ARG 1,0C	235,5	126,8	2189,0	0,0	1,43	2,20
	ARG 1,5C	189,2	152,8	2198,9	0,0	1,52	2,75
	ARG 1,7C	175,4	160,6	2201,8	0,0	1,59	3,05

a/l = relação água/ligantes; a/c = relação água/cimento

3.3.3.2 Massa unitária

O procedimento para determinação da massa unitária das argamassas no estado anidro foi adaptado da ABNT NBR NM 45:2006, visto que foi utilizado um recipiente cilíndrico com dimensões menores ao indicado no código normativo, procedendo-se da seguinte forma:

a) Aferiu-se a massa do recipiente cilíndrico vazio (m_r);
b) A partir de uma amostra de 2000 gramas de argamassa seca, preencheu-se o recipiente cilíndrico com o auxílio de uma espátula, despejando-se o material a uma altura de 5 centímetros em relação a borda superior, até transbordar;
c) Realizou-se o nivelamento do material, removendo o excedente; e
d) Aferiu-se a massa do recipiente preenchido com a argamassa (m_{ra}).

Repetiu-se esse procedimento por cinco vezes, sendo a massa unitária da argamassa calculada pela média dos resultados obtidos pela Equação 3.5:

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ra} - m_r)}{V} \quad (3.5)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária da argamassa (g/cm³);

m_{ra} = massa do recipiente cheio com argamassa (g);

m_r = massa do recipiente vazio (g); e

V = volume do recipiente (cm³).

3.3.3.3 Distribuição granulométrica

Realizou-se a distribuição granulométrica das argamassas a partir de uma amostra de 1000 gramas, passadas na sequência de peneiras com malhas de 2,36; 1,18; 0,60; 0,30; 0,15, e 0,075 mm, conforme prescrição da ABNT NBR NM 248:2003. Os perfis granulométricos foram elaborados a partir do acumulado dos percentuais passantes nas peneiras, sendo calculados o módulo de finura e o coeficiente de uniformidade.

3.3.4 Procedimentos no estado fresco

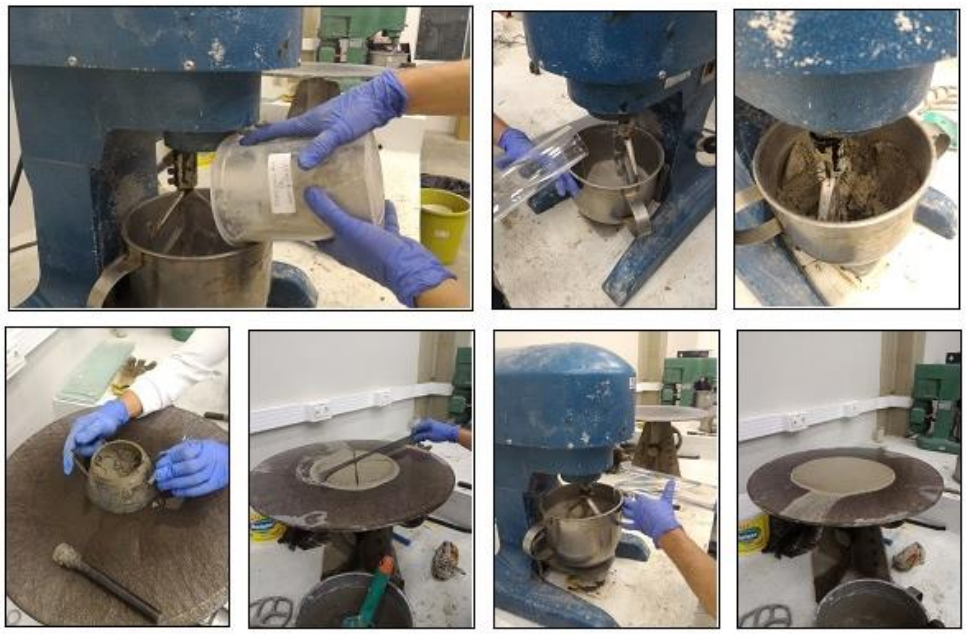
3.3.4.1 Índice de consistência das argamassas

Conforme mencionado na seção 3.1, dessa dissertação, padronizou-se o índice de consistência das argamassas em 260 ± 5 mm, aferindo-se esse parâmetro com a adição gradativa de água à mistura de argamassa seca. Procedeu-se da seguinte forma:

a) Verteu-se na cuba do misturador 2000 gramas da argamassa seca que foi previamente preparada;
b) Em seguida, adicionou-se uma quantidade de água necessária para plastificar a argamassa minimamente, ligando-se o misturador em velocidade baixa.
c) Após observar a homogeneização da mistura, desligou-se o misturador, removendo-se a cuba;
d) Sobre a mesa de abatimento, com auxílio de uma concha plástica preencheu-se a forma tronco-cônica com a argamassa, em três camadas iguais, seguidas de golpes com um soquete metálico na quantidade de 15, 10 e 5 golpes, respectivamente;
e) Na sequência, realizou-se o nivelamento da argamassa e removeu-se a forma tronco-cônica;
f) Realizou-se 30 movimentos de queda na mesa de abatimento e com o auxílio de uma régua metálica, aferiu-se o diâmetro em dois pontos perpendiculares, equivalendo-se ao espalhamento da argamassa no ponto de aferição; e
g) Em seguida, recolheu-se toda a argamassa a cuba, posicionando-a no misturador que foi ligado na velocidade baixa para adição de água novamente. Repetiu-se esse procedimento por 5 vezes, de modo que nos dois últimos pontos o espalhamento superou 260 mm.

Observa-se na Figura 3.8 a sequência do procedimento adotado para definir a quantidade de água a obtenção do índice de consistência padronizado.

Figura 3.8 - Sequência do procedimento para definição da consistência das argamassas



(a) Colocação da argamassa seca na cuba, (b) Adição de água para ensaio inicial de consistência, (c) Homogeneização da argamassa no misturador em velocidade baixa, (d) Preenchimento do tronco-cônico com a argamassa, (e) Aferição dos diâmetros de espalhamento da argamassa no primeiro ponto, (f) Nova adição de água na argamassa, e (g) Aspecto da argamassa no quarto ponto de aferição do espalhamento.

Com os dados coletados no procedimento: (i) espalhamento, e (ii) a relação água/materiais secos, procedeu-se com a montagem dos gráficos, sendo utilizada a equação da linha de tendência para o cálculo da relação água/materiais secos no ponto de espalhamento equivalente a 260 mm.

3.3.4.2 Preparação das argamassas

Utilizou-se uma argamassadeira de movimento planetário com duas velocidades na preparação das argamassas, sendo o procedimento sequenciado, a seguir:

a) Verteu-se na cuba do misturador, previamente umedecida, toda a água da argamassa;
b) Na sequência, adicionou-se sobre a água 3000 gramas da mistura seca da argamassa, no tempo de 10 segundo, ainda com o misturador desligado;
c) Em seguida, ligou-se o misturador, na velocidade baixa, durante 80 segundos.
d) Logo após esse tempo, desligou-se o misturador, durante 90 segundos, sendo nos 10 segundos iniciais promovida a retirada da argamassa aderida nas paredes da cuba, depositando-a no interior do recipiente para continuidade na mistura. Durante o restante do tempo (80 segundos), a argamassa permaneceu em repouso na cuba, coberta com um pano úmido.
e) Imediatamente, após o repouso, ligou-se o misturador na velocidade alta, por mais 60 segundos, totalizando assim 4 minutos de mistura.

Observa-se na Figura 3.9, a sequência do procedimento de preparação das argamassas.

Figura 3.9 - Sequência do procedimento de preparação das argamassas

(a) Adição de água na cuba, (b) Colocação da argamassa seca sobre a água, (c) Mistura da argamassa em velocidade baixa, e (d) Repouso da argamassa coberta com pano úmido, imediatamente, após esse intervalo liga-se o misturador, em velocidade alta, por 60 segundos

3.3.4.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Após a preparação da argamassa, realizaram-se os ensaios para determinação da densidade de massa no estado plástico e teor de ar incorporado, de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 13278:2005, conforme ilustrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado

(a), (b) Preenchimento de recipiente cilíndrico com a argamassa, seguido da aferição de massa

3.3.4.4 Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Após a realização do procedimento para determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado nas argamassas, iniciou-se a moldagem dos corpos-de-prova (CP) para avaliação das propriedades no estado endurecido.

Para cada argamassa, utilizou-se duas formas metálicas compartimentadas em placa, sendo preenchidas em duas camadas adensadas com o auxílio de um soquete por 30 golpes, cada. Na sequência, sobre a mesa de consistência, efetuou-se 5 quedas livres. Logo após, regularizou-se o preenchimento dos compartimentos, promovendo-se mais 5 quedas livres na mesa de consistência. Por fim, retirou-se o excesso de argamassa promovendo o nivelamento pela borda superior do molde. Na sequência, cobriu-se as argamassas com uma lona de Neoprene, envolvendo os moldes com filme plástico. Após 48 horas, realizou-se a desforma dos CP´s iniciando a cura ao ar, em condições de laboratório, por mais 26 dias.

Observa-se na Figura 3.11, a sequência do procedimento de moldagem e cura dos corpos-de-prova.

Figura 3.11 - Moldagem e cura dos corpos-de-prova 4 x 4 x 16 cm

(a) Moldes metálicos e recipiente contendo a argamassa seca, (b) Preenchimento dos moldes metálicos, (c) Adensamento com o soquete, (d) Adensamento na mesa de consistência, (e) Nivelamento da argamassa, (f) Proteção das argamassas nas 48 horas iniciais de cura, (g) Desforma das argamassas após 48 horas da moldagem, e (h) Acondicionamento dos CP´s até a realização dos ensaios mecânicos

3.3.5 Procedimentos no estado endurecido

Os resultados dos ensaios mecânicos e de desempenho foram utilizados como variáveis respostas na modelagem estatística. Observa-se na Tabela 3.8 os procedimentos realizados nas argamassas no estado endurecido, após 28 dias de cura.

Tabela 3.8 – Ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido

Método	Código Normativo	Quantidade de CP´s
Variação de massa	Não aplicável	6
Densidade de massa aparente	ABNT NBR 13280:2005	6
Absorção de água e Índice de vazios	ABNT NBR 9778:2009	3
Módulo de elasticidade Dinâmico	ABNT NBR 15630:2009	6
Coeficiente de capilaridade	ABNT NBR 15259:2005	3
Resistência à tração na flexão	ABNT NBR 13279:2005	3
Resistência à compressão	ABNT NBR 13279:2005	6
Resistência de aderência à tração	ABNT NBR 13528:2010	5
Índice de fissuração (m/m²)	Não aplicável	1

3.3.5.1 Variação de massa

A variação de massa dos CP´s de argamassa ao longo do tempo, relaciona-se com parâmetros físicos e químicos como a retenção de água e as reações de hidratação do cimento e da carbonatação do hidróxido de cálcio, respectivamente.

A partir da desforma dos moldes metálicos, 48 horas após a confecção das argamassas, aferiu-se a massa dos corpos-de-prova, diariamente. A taxa de variação de massa foi medida pela Equação 3.6:

$$\Delta m = \frac{(m_0 - m_n)}{m_0} \tag{3.6}$$

Onde:

Δm = Taxa de variação de massa (adimensional);

m_0 = massa inicial do CP no dia da desforma (g); e

m_n = massa do CP após n dias (g).

A partir dos dados coletados no procedimento, procedeu-se com a montagem dos gráficos indicando a variação de massa ao longo do tempo.

3.3.5.2 Densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico

A densidade de massa aparente e o módulo de elasticidade dinâmico (MED) foram aferidos seguindo as prescrições da ANBT NBR 13280:2005 e NBR 15630:2009, sendo os procedimentos realizados na mesma data.

O cálculo do MED foi elaborado pela Equação 3.7:

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1+\mu)+(1-2\mu)}{1-\mu} \tag{3.7}$$

Onde:

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

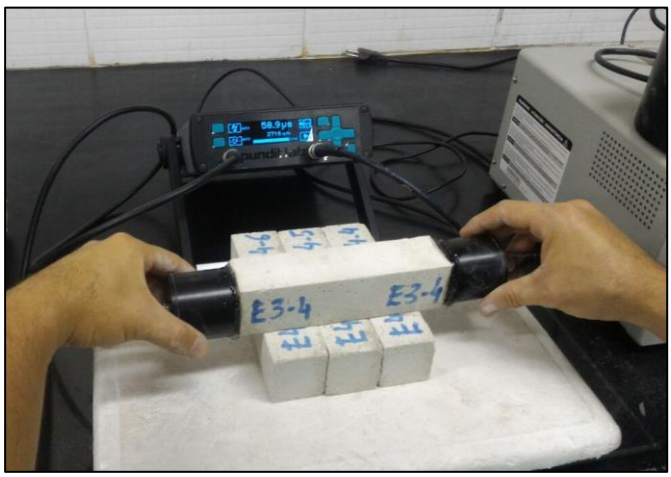
v = Velocidade de propagação de onda ultrassônica (mm/μs);

ρ = Densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m³); e

μ = Coeficiente de Poisson.

Observa-se na Figura 3.12 a aferição da velocidade do pulso ultrassônico que foi obtido em um aparelho de ultrassom (Pundit Lab, modelo 32610001 da marca Proceq).

Figura 3.12 - Aferição da velocidade do pulso ultrassônico



3.3.5.3 Resistências à tração na flexão e compressão

Utilizou-se uma prensa universal (marca Shimadzu, modelo Autograph AG-X) para determinação das resistências à tração na flexão e compressão, conforme prescrições da ABNT NBR 13279:2005.

A partir de 3 corpos de prova com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, para cada argamassa, realizou-se a ruptura à flexão resultando em duas metades (6 amostras) que foram utilizadas para a ruptura à compressão, com velocidades de carregamentos de 50 N/s e 500 N/s, respectivamente.

Observa-se na Figura 3.13 (a) e (b) a realização dos ensaios de resistências à tração na flexão e compressão.

Figura 3.13 - Ensaios de resistências à tração na flexão e compressão

(a) Ensaio de resistência à tração na flexão, e (b) Resistencia à compressão

3.3.5.4 Coeficiente de capilaridade

Avaliou-se a permeabilidade capilar das argamassas através do coeficiente de capilaridade e taxa de absorção de água, conforme prescrições normativas da ABNT NBR 15259:2005.

Aferiu-se a massa dos corpos de prova, após o contato com lâmina de água com 5 mm, nos tempos de 4, 10, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 90, 100 e 121 minutos, sendo

o coeficiente de capilaridade e a taxa de absorção de água, calculados pelas Equações 3.8 e 3.9:

$$A_t = \frac{(m_t - m_0)}{16} \tag{3.8}$$

$$C = m_{90} - m_{10} \tag{3.9}$$

Onde:

A_t = Absorção de água por capilaridade (g/cm²);

m_t = massa do CP no tempo previsto (g);

m_0 = massa inicial do CP (g);

m_{10} = massa do CP aos 10 minutos de contato com a água (g);

m_{90} = massa do CP aos 90 minutos de contato com a água (g); e

C = Coeficiente de capilaridade (g/dm².min$^{1/2}$).

Ilustra-se nas Figuras 3.14 (a), (b), (c), (d) e (e) a ascensão capilar nas argamassas 0,3C 50S; 1,7C 50S; 1,0C 14,7S e 1,0C 85,3S (pontos axiais).

Figura 3.14 - Ascensão capilar nas argamassas dos pontos axiais

(a), (b), (c), (d) e (e) Indicação da ascensão capilar nos tempos 10 e 90 min das argamassas 0,3C 50S; 1,7C 50S; 1,0C 14,7S e 1,0C 85,3S

3.3.5.5 Absorção de água e índice de vazios

A absorção de água e índice de vazios das argamassas foram verificados a partir das prescrições da ABNT NBR 9778:2009, ilustrados nas Figuras 3.15 (a), (b), (c) e (d), sendo determinados pelas Equações 3.10 e 3.11, respectivamente:

$$A_{bs} = \frac{(m_{sat} - m_s)}{m_s} \; x \; 100 \tag{3.10}$$

$$I_v = \frac{(m_{sat} - m_s)}{(m_{sat} - m_i)} \; x \; 100 \tag{3.11}$$

Onde:

A_{bs} = Absorção de água por imersão (%);

I_v = Índice de vazios (%);

m_{sat} = Massa do CP saturado após imersão e fervura (g);

m_s = Massa do CP seco em estufa por 72 horas (g); e

m_i = Massa do CP imersa em água após fervura (g).

Figura 3.15 - Absorção de água e índice de vazios das argamassas

(a) Corpos de prova submersos em água por 72 horas, (b) Banho térmico por 5 horas, (c) Aferição da imersa em água após fervura, e (d) Aferição de massa saturada após fervura

3.3.5.6 Índice de fissuração e resistência de aderência

Com o objetivo de avaliar o desempenho das argamassas, inicialmente, construiu-se uma parede com dimensões de 1,6 x 6,0 m, com o auxílio de um pedreiro com 15 anos de experiência na função, utilizando blocos de concreto ($f_{bk,comp}$ = 8,9 MPa; absorção = 5,3 %) assentados com argamassa mista de cimento e cal ($f_{ak,comp}$ = 8,2 MPa e $f_{ak,tração}$ = 2,3 MPa), no traço 1:1:6 (em volume), sendo a espessura das juntas de assentamento iguais a 10 mm, conforme ilustrado na Figura 3.16 (a).

Após 35 dias da construção da parede, produziu-se o chapisco e taliscamento com espessura de 2 cm utilizando argamassa de cimento, no traço 1:3 (em volume). Observa-se na Figura 3.16 (b) a parede com chapisco e taliscamento executados.

Figura 3.16 - Parede com chapisco e taliscamento dos painéis

(a) Parede construída com blocos de concreto e argamassa mista de cimento e cal, e (b) Chapisco e taliscamento executados na parede em blocos de concreto

Decorridos 7 dias de cura do chapisco, produziu-se o reboco em painéis com dimensões de 40 x 60 cm, sendo as argamassas produzidas conforme descrito na seção 3.3.4.2, dessa dissertação.

No intuito de reconhecer as alterações no comportamento das argamassas no estado plástico, por influência da substituição parcial do AN por ARC, avaliou-se

qualitativamente os aspectos de brilho [3] e plasticidade [4], por inspeção visual, e trabalhabilidade[5] através de entrevista com o pedreiro. Também buscou-se associar à trabalhabilidade, o tempo de execução dos painéis, sendo monitorado os tempos de aplicação da argamassa, dividida nas etapas de enchimento, sarrafeamento e desempolamento, conforme ilustrado nas Figuras 3.17 (a), (b), (c), (d) e (e).

Figura 3.17 – Aplicação da argamassa nos painéis

(a),(b) Avaliação qualitativa da argamassa quanto ao brilho, plasticidade e trabalhabilidade, (c), (d) e (e) Etapas do reboco compreendendo o preenchimento, sarrafeamento e desempolamento da argamassa

Durante 56 dias monitorou-se a ocorrência de fissuras nos painéis de argamassa, por inspeção visual a distância de 1 metro da parede e realizada sempre no período da manhã. O índice de fissuração foi determinado pela razão entre a soma dos comprimentos lineares das fissuras pela área do painel, sendo o resultado expresso em m/m².

A resistência de aderência à tração foi aferida aos 56 dias por extração de testemunho com o auxílio de uma máquina de arrancamento manual digital, capacidade de carga de 500 kgf, marca Solotest. O procedimento foi adaptado das prescrições da ABNT NBR 13528:2010, a seguir:

a) Inicialmente, realizou-se a marcação de 5 pontos aleatórios, em cada painel;

[3,4] O aspecto do brilho foi utilizado como indicativo para avaliar a quantidade de água adequada na argamassa. Já a plasticidade foi o indicativo da capacidade de se moldar, avaliado na argamassadeira com uso da colher de pedreiro.

[5] O aspecto da trabalhabilidade foi utilizado como indicativo da capacidade de manuseio da argamassa pelo pedreiro.

b) Posteriormente, com o auxílio de uma serra copo diamantada (diâmetro 52 mm) acoplada à uma furadeira, realizou-se o corte a seco do reboco estendendo-se 5 mm no substrato de concreto.
c) Na sequência, colaram-se os discos de alumínio (Ø 50 x 20 mm), utilizando adesivo epóxi, marca Araldite;
d) Após 24 horas, da colagem dos discos sobre o reboco, efetuou-se a extração dos testemunhos, registrando-se a carga (N) e forma de ruptura; e
e) Ao final, extraiu-se amostras de cada painel para determinação da umidade.

CAPÍTULO 4

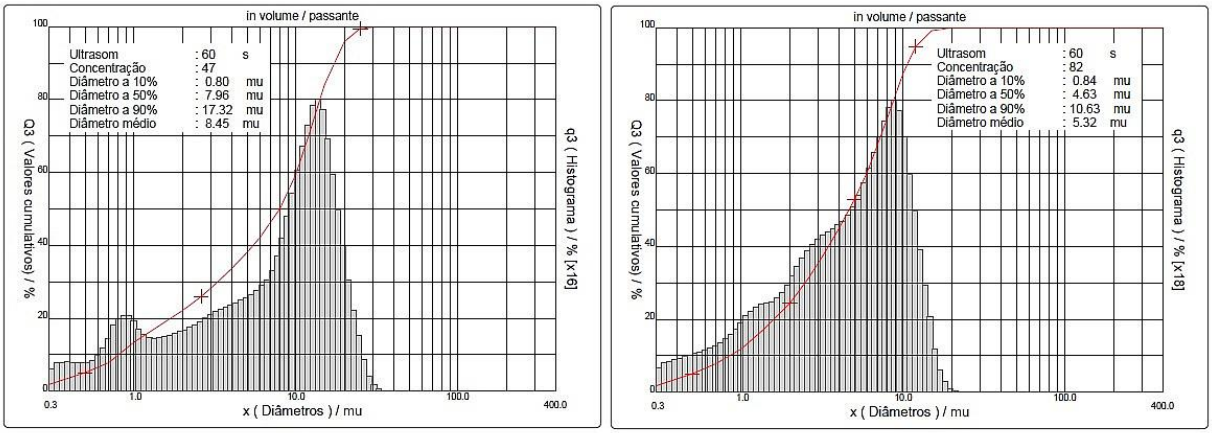
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES

4.1.1 Granulometria a laser e área superficial

O cimento, com área superficial de 1,12 m²/g, possui distribuição dos grãos com diâmetro médio equivalente a 8,45 µm, sendo 90% com diâmetro inferior a 17,32 µm, enquanto a cal, com área superficial de 3,69 m²/g, possui distribuição das partículas com diâmetro médio equivalente a 5,32 µm, sendo 90% com diâmetro inferior a 10,63 µm, observado nas Figuras 4.1(a) e 4.1(b), respectivamente.

Figura 4.1 - Distribuição granulométrica - (a) Cimento CP II - Z; (b) Cal CH I



4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados utilizados nesse estudo continham dimensões menores que 4,75 mm, sendo avaliados também os finos menores que 0,075 mm, conforme comentado na seção 3.3.2 dessa dissertação.

Na Tabela 4.1 é apresentado o comparativo entre a massa unitária, massa específica e índice de vazios do ARC e AN, menores que 4,75 mm.

Tabela 4.1 – Comparativo entre massas unitária, específica e índice de vazios do ARCF e AN

Parâmetro	ARCF 1	ARCF 2	ARCF 3	AN
Massa unitária (g/cm³)	1,15	1,02	1,09	1,41
Massa específica (g/cm³)	2,49	2,38	2,46	2,52
Índice de vazios	2,17	2,33	2,26	1,79

Índice de vazios não compactado = (massa específica / massa unitária) – 1, adimensional

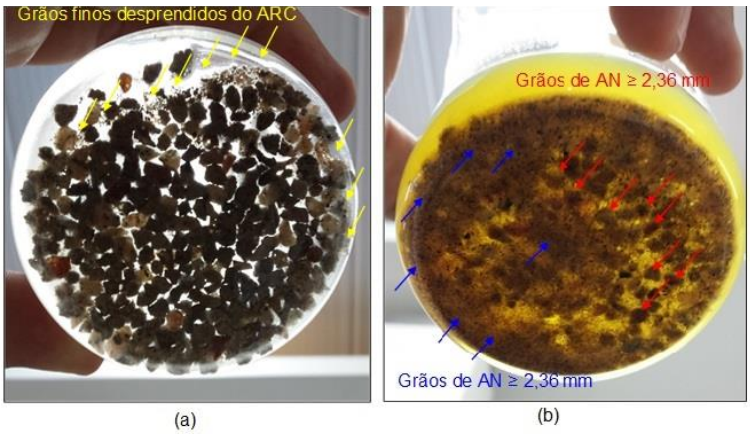
Observa-se que o ARCF é mais leve e possui mais vazios na distribuição dos grãos quando comparado ao AN, visto os valores médios das massas unitária (1,09 e 1,41 g/cm³), específica (2,44 e 2,52 g/ cm³) e índice de vazios (1,24 e 0,79), respectivamente.

A menor densidade do ARCF ocorre principalmente pelo teor de argamassa aderida ao grão (EVANGELISTA; DE BRITO, 2007; CARTUXO *et al.* 2014; MEHTA; MONTEIRO, 2016). Já quanto ao índice de vazios, Tristão (2005) comenta que o parâmetro é dependente da distribuição granulométrica e significativamente pela forma do grão.

4.2.1 Avaliação quantitativa do teor de argamassa no ARCF

Quantificou-se o teor de argamassa no ARCF através do tratamento térmico a 500 ºC, por uma hora, seguido de dissolução em ácido clorídrico (1 H_2O : 2 HCl), a partir de grãos com dimensão equivalente a 2,36 mm. Observou-se na Figura 4.2 (a) que o tratamento térmico pouco contribuiu para remoção da argamassa no ARCF, visto a pequena quantidade de grãos finos soltos.

Figura 4.2 - Amostra do ARCF após choque térmico e dissolução em ácido clorídrico



(a) (b)

As tensões térmicas diferenciais exercidas sobre os constituintes da amostra não foram suficientes para promover a separação total dos grãos nas condições de aquecimento até 500 ºC, por uma hora.

Akbarnezhad e Ong (2013), relatam que o aquecimento do ARC a 500 ºC, por duas horas, reduz o teor de argamassa em apenas 12,8%.

Após o tratamento térmico e agressão ácida, observou-se na Tabela 4.2, que os teores de argamassa aderida ao ARCF variaram de 29 a 34%, condizentes com relatos anteriores que mencionam uma variação de 20 a 70% (AKBARNEZHAD *et al.*, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2016).

Tabela 4.2 – Teor de argamassa aderida ao ARCF

Parâmetro	ARCF 1	ARCF 2	ARCF 3
Massa do ARC (g)	10,02	10,01	10,00
Massa de ARC após dissolução com ácido (g)	6,59	6,11	6,69
Massa de microfinos (g)	0,33	0,51	0,39
Teor de argamassa aderida ao ARC (%)	30,9	33,8	28,1
Distribuição dos grãos de AN após dissolução no ácido clorídrico			
Abertura da peneira (mm)	% retido		
2,36	38,4	36,0	34,9
1,18	24,3	20,9	24,9
< 1,18	37,3	43,0	40,2

Observa-se que 35 a 38% da amostra do ARCF era formada por grãos de AN sem argamassa aderida, visto que após a dissolução com ácido ainda continham grãos com dimensões equivalentes a 2,36 mm.

Ressalta-se que o agregado reciclado utilizado nas argamassas produzidas nessa dissertação foi o ARCF 1, por conter um teor de ligante intermediário (31%) entre as amostras.

4.2.2 Relação entre absorção de água, teor de argamassa e perda por abrasão Los Angeles

A variabilidade no teor de argamassa em amostras de ARC é depende da resistência da argamassa no concreto original, tamanho de partículas e do processo de moagem utilizados durante a produção (AKBARNEZHAD *et al.*, 2013). Além disso a elevada porosidade da argamassa quando comparada ao AN contribui para a maior absorção de água no ARC (MARTÍN; MORALES *et al*., 2011).

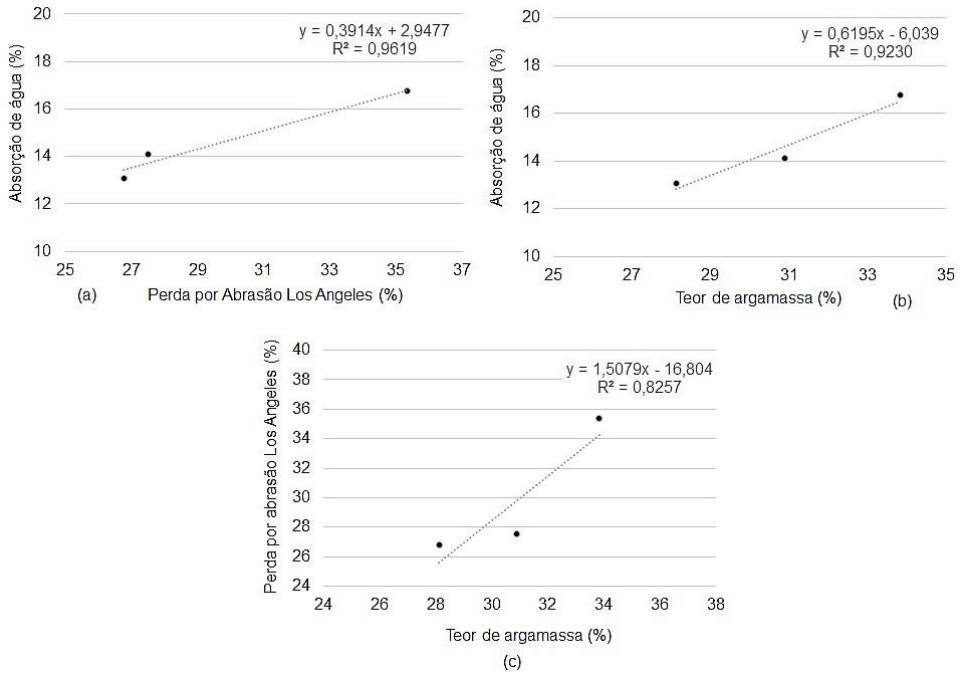
Observa-se na Tabela 4.3 uma variação de 26,8 a 35,3% e de 13,1 a 16,7% para a resistência superficial por abrasão Los Angeles e absorção de água nas amostras de ARCF 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 4.3 – Comparativo entre absorção de água, teor de argamassa e resistência superficial por abrasão Los Angeles no ARCF

Parâmetro	ARCF 1	ARCF 2	ARCF 3
Perda por abrasão Los Angeles (%)	27,5	35,3	26,8
Absorção de água (%)	14,1	16,7	13,1
Teor de argamassa aderida ao ARC (%)	30,9	33,8	28,1

O teor de argamassa, a resistência superficial e a absorção de água são parâmetros importantes para avaliar a qualidade do ARCF. Constatou-se nas Figuras 4.3 (a), (b) e (c) forte correção linear ao avaliar a absorção de água *versus* abrasão Los Angeles (R^2 = 0,96); absorção de água *versus* teor de argamassa (R^2 = 0,92) e abrasão Los Angeles *versus* teor de argamassa (R^2 = 0,83).

Figura 4.3 - Relação linear entre absorção de água, teor de argamassa e resistência superficial por abrasão Los Angeles no ARCF



A forte correlação linear entre absorção de água e abrasão Los Angeles *versus* teor de argamassa, em ARC, também foi constatada por Akbarnezhad e Ong (2013), em estudo a partir de concreto com resistências à compressão de 30 e 60 MPa, sendo os coeficientes R^2 iguais a 0,80 - 0,82 e 0,70 – 0,72, respectivamente.

4.2.3 Distribuição granulométrica dos agregados

Em relação ao AN, observa-se na Tabela 4.4 os resultados para a distribuição granulométrica entre as amostras AN 1, 2, 3 e 4.

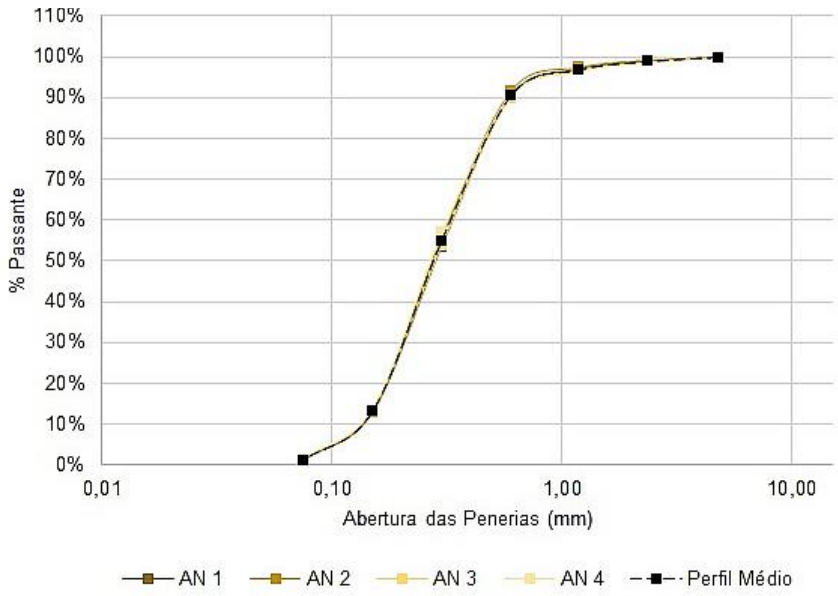
Tabela 4.4 – Distribuição granulométrica das amostras do agregado natural

Peneira (mm)	Percentuais passante acumulados				
	AN 1	AN 2	AN 3	AN 4	Perfil Médio
4,75	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,36	99,2	99,3	98,8	98,7	99,0
1,18	97,2	97,6	96,5	96,5	96,9
0,6	90,6	91,8	90,0	90,3	90,7
0,3	53,6	55,8	54,0	57,1	55,1
0,15	13,0	12,8	13,5	13,7	13,2
0,075	1,1	1,4	1,4	1,4	1,3

O teor de finos passante na malha 75 μm que compõe 1,3% do AN, em média, não foi removido para a formulação das argamassas, visto que esse procedimento não é praticado nos canteiros de obras, buscando assim aproximar-se da composição da argamassa em situação real.

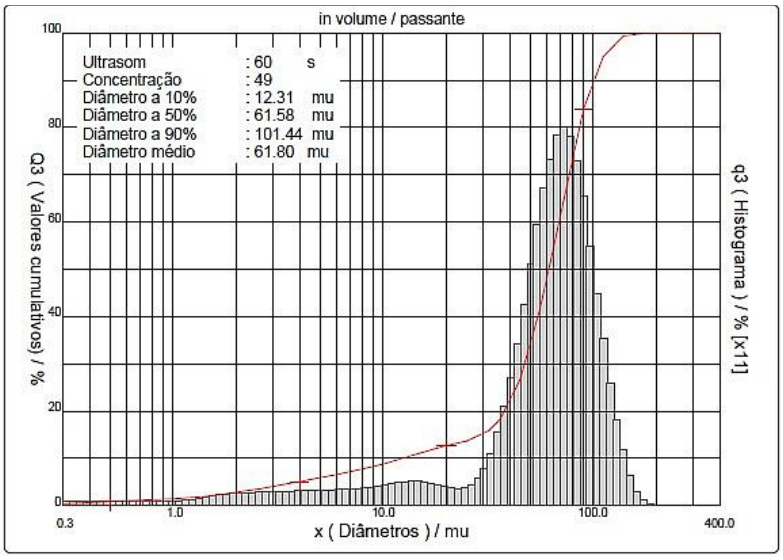
Observa-se na Figura 4.4, praticamente a sobreposição na distribuição granulométrica entre as amostras do AN, sendo característico a uniformidade na distribuição devido à predominância dos grãos na faixa 0,15 – 0,30 mm.

Figura 4.4 - Perfis granulométricos das amostras do AN



Os grãos menores que 0,075 mm possuem diâmetro médio equivalente a 61,80 µm, sendo 90% das partículas com diâmetro inferior a 101,44 µm, conforme demonstrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Distribuição granulométrica dos grãos do AN menores que 75 µm

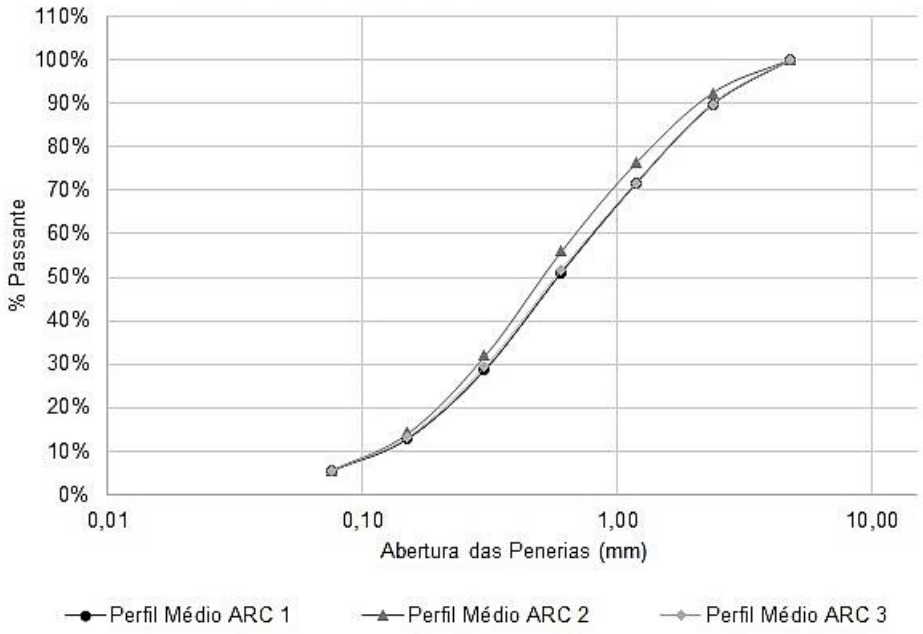


Em relação ao ARCF, observa-se nas Tabela 4.5 e Figura 4.6, uma distribuição granulométrica contínua e sobreposição entre os perfis médios do ARCF 1 e 3, sendo o ARCF 2 levemente mais fino que as amostras 1 e 3, corroborando com os resultados de Martinez *et al.* (2016).

Tabela 4.5 – Distribuição granulométrica das amostras do agregado reciclado

Peneira (mm)	Percentuais passantes acumulados		
	Perfil Médio ARCF 1	Perfil Médio ARCF 2	Perfil Médio ARCF 3
4,75	100	100	100
2,36	89,8	92,4	89,9
1,18	71,6	76,4	71,8
0,6	51,1	56,0	51,8
0,3	28,6	32,0	29,5
0,15	12,9	14,3	13,3
0,075	5,4	5,7	5,4

Figura 4.6 - Perfis granulométricos médios dos ARCF

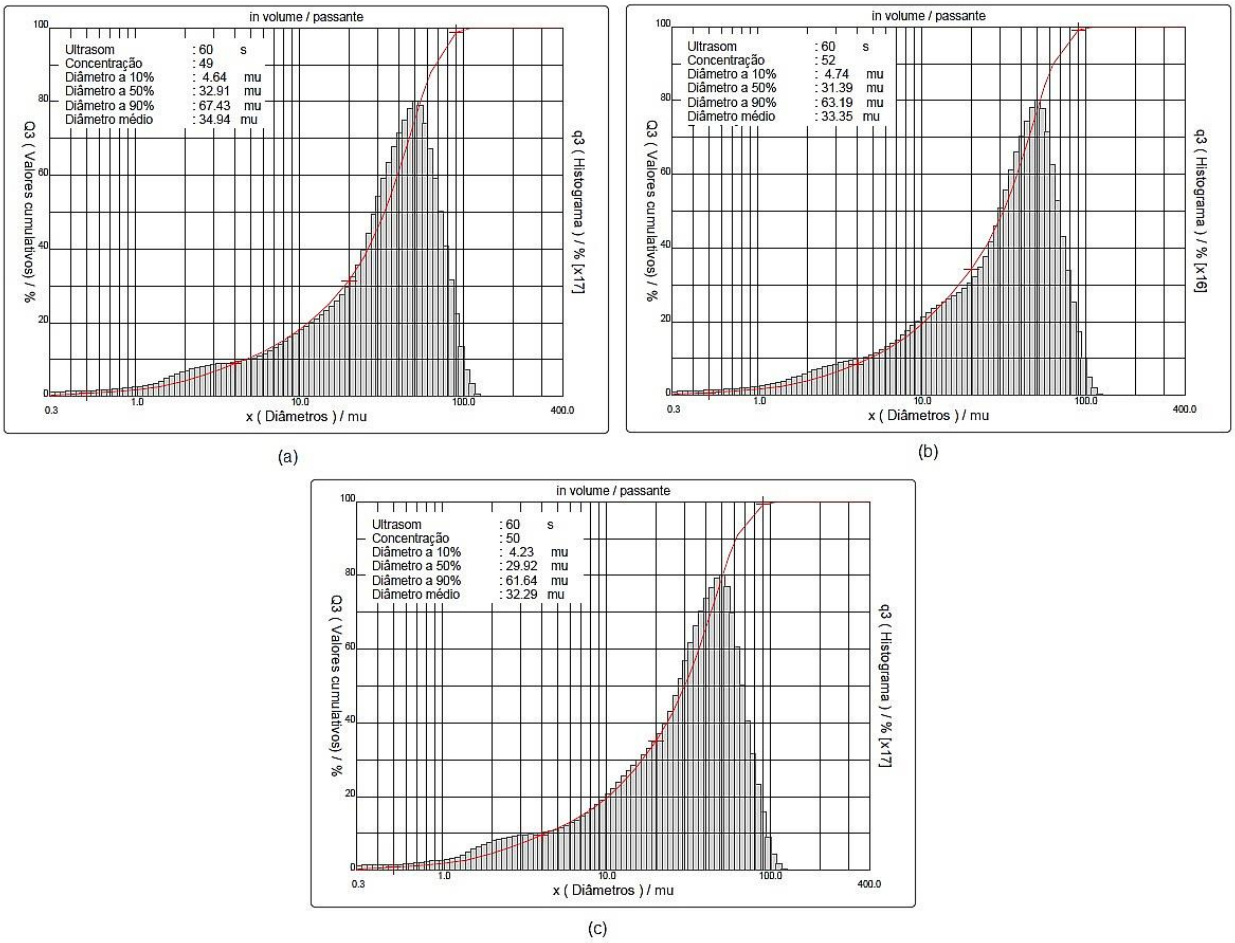


Os teores de finos passante na malha 75 µm compõem de 5,4 a 5,7% das amostras de ARCF, conforme demonstrado na Tabela 4.4.

Observa-se nas Figuras 4.7 (a), (b) e (c) o diâmetro médio equivalente a 34,94; 33,35 e 32,29 µm, sendo 90% das partículas com diâmetro inferior a 67,43; 63,19 e 61,64 µm, para os ARCF 1, 2 e 3, respectivamente.

Segundo Fan *et al.* (2016), o processo de produção pode influenciar as propriedades físicas básicas dos agregados finos reciclados de concreto.

Figura 4.7 - Perfis granulométricos dos grãos menores que 75 µm – (a) ARCF 1; (b) ARCF 2 e (c) ARCF 3



De acordo com as Figuras 4.9 (a), (b) e (c), aproximadamente 10% dos finos passantes na malha 75 µm relativo aos ARCF 1 (4,64 µm), 2 (4,74 µm) e 3 (4,23 µm) possuem diâmetro inferior ao diâmetro médio do cimento (8,45 µm).

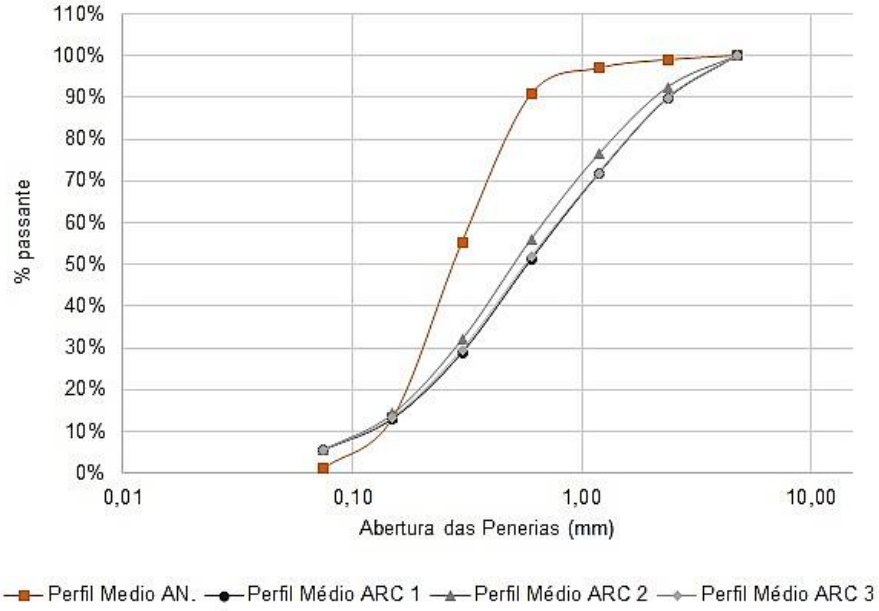
Observa-se na Tabela 4.6 e Figura 4.8 que o AN, com perfil granulométrico uniforme (Cu = 0,60), apresenta menos finos (1,3%) quando comparado aos ARCF 1

(5,4%), 2 (5,7%) e 3 (5,4%), que apresentam perfis granulométricos contínuos e coeficientes de uniformidade iguais a 5,19; 4,94; e 5,13, respectivamente.

Tabela 4.6 – Propriedades físicas dos agregados a partir da granulometria

Agregado miúdo	Módulo de finura	Coeficiente de Uniformidade	Teor de finos < 75 µm (%)
AN	2,44	0,60	1,3
ARC 1	3,41	5,19	5,4
ARC 2	3,23	4,94	5,7
ARC 3	3,38	5,13	5,4

Figura 4.8 - Perfis granulométricos médios dos AN e ARCF



O AN possui grãos mais finos (MF = 2,44) que os ARCF 1, 2 e 3, com respectivos módulos de finura iguais a 3,41; 3,23 e 3,38.

4.2.4 Composição química e mineralógica dos finos passantes na malha 75 µm

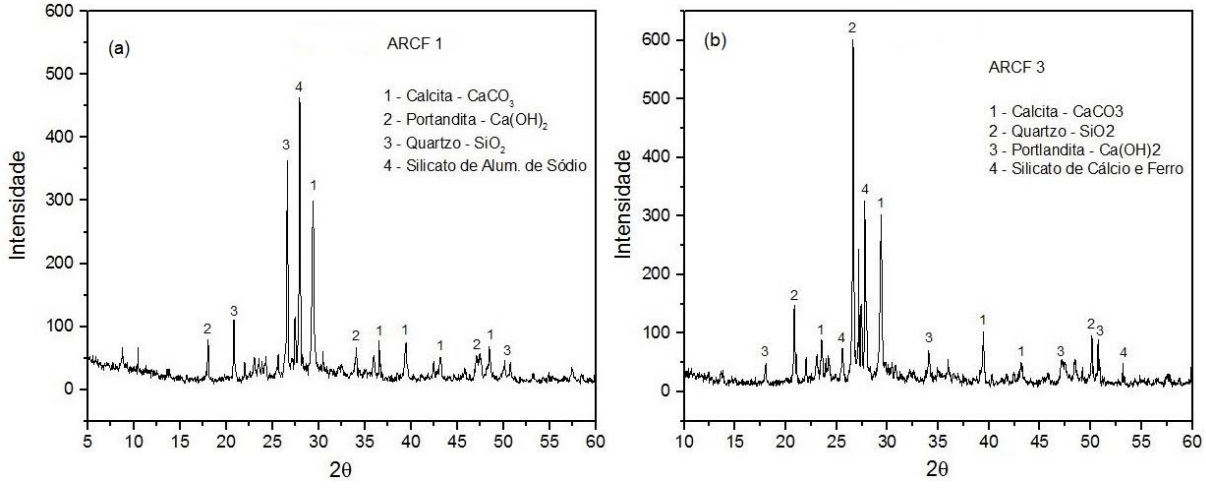
Observa-se na Tabela 4.7 que o cálcio, silício e o ferro, representam 84,40; 87,40; 84,35 e 65,86% da composição química dos ARCF 1, 2, 3 e do AN, respectivamente, o que se assemelham aos resultados de Martinez *et al.* (2016) (79,59%) para o ARCF.

Tabela 4.7 – Composição química por FRX dos finos passantes na malha 0,075 mm

Finos (< 75 µm)	% de óxidos (em massa)								
	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	ZrO_2	K_2O	SrO	TiO_2	Outros
ARCF 1	58,56	15,16	10,68	4,82	1,71	3,53	1,74	1,06	2,74
ARCF 2	60,32	13,50	13,58	4,80	1,41	2,86	1,10	0,67	1,76
ARCF 3	51,67	19,52	13,16	5,72	1,53	4,66	2,81	-	0,93
AN	9,94	28,02	27,90	11,07	9,96	5,50	2,67	2,13	2,81

As amostras do ARCF 1 e 3 foram produzidas a partir de resíduos de concreto e argamassa coletados nas fases de fundação e acabamento em uma construção, respectivamente, conforme relatado na seção 3.3.2 dessa dissertação. Assim, as fases cristalinas calcita ($CaCO_3$), portandita ($Ca(OH)_2$) e silicatos, apresentadas nas Figuras 4.9 (a) e (b), são oriundas do sistema de hidratação do cimento. Esses resultados condizem com as observações de Evangelista *et al.* (2015).

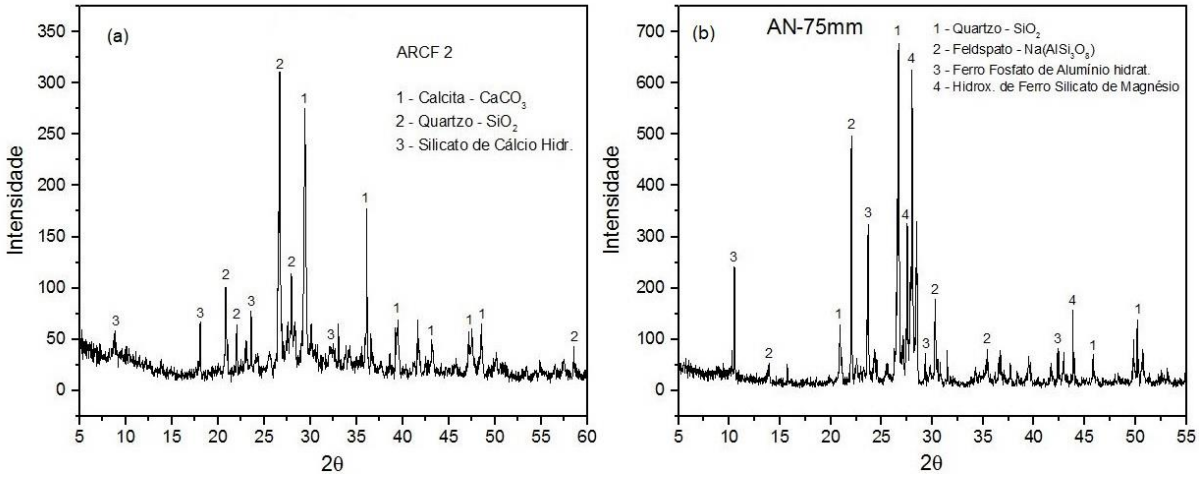
Figura 4.9 – Difratogramas – (a) ARCF 1 e (b) ARCF 3



Já a amostra do ARCF 2 foi produzida a partir de resíduos de blocos de concreto para alvenaria estrutural.

No difratograma apresentado na Figura 4.10 (a), observa-se a presença marcante da calcita ($CaCO_3$) e do quartzo (SiO_2) no ARCF 2. Associado ao fato, constata-se na Tabela 4.7, uma maior quantidade de cálcio (60,32%) entre as amostras de ARCF podendo ser resultado de anidros devido ao concreto original ser vibro prensado, sendo descarta a possibilidade do cálcio ter origem de componentes carbonatos (EVANGELISTA, 2015), visto se tratar de concreto novo beneficiado no momento da construção.

Figura 4.10 – Difratogramas – (a) ARCF 2 e (b) AN



Para o AN de origem silicosa, como era de se esperar, observa-se na Figura 4.10 (b) a presença marcante do quartzo (SiO_2).

4.2.5 Morfologia dos agregados por MEV

Visto que as argamassas com agregado reciclado produzidas nessa dissertação utilizaram um dos resíduos entre as três amostras coletas, conforme comentado na seção 4.2.1, as avaliações morfológicas com MEV que será apresentado nessa seção 4.2.5 e de reatividade que será apresentado na seção 4.2.6, foram realizadas apenas com o ARCF 1.

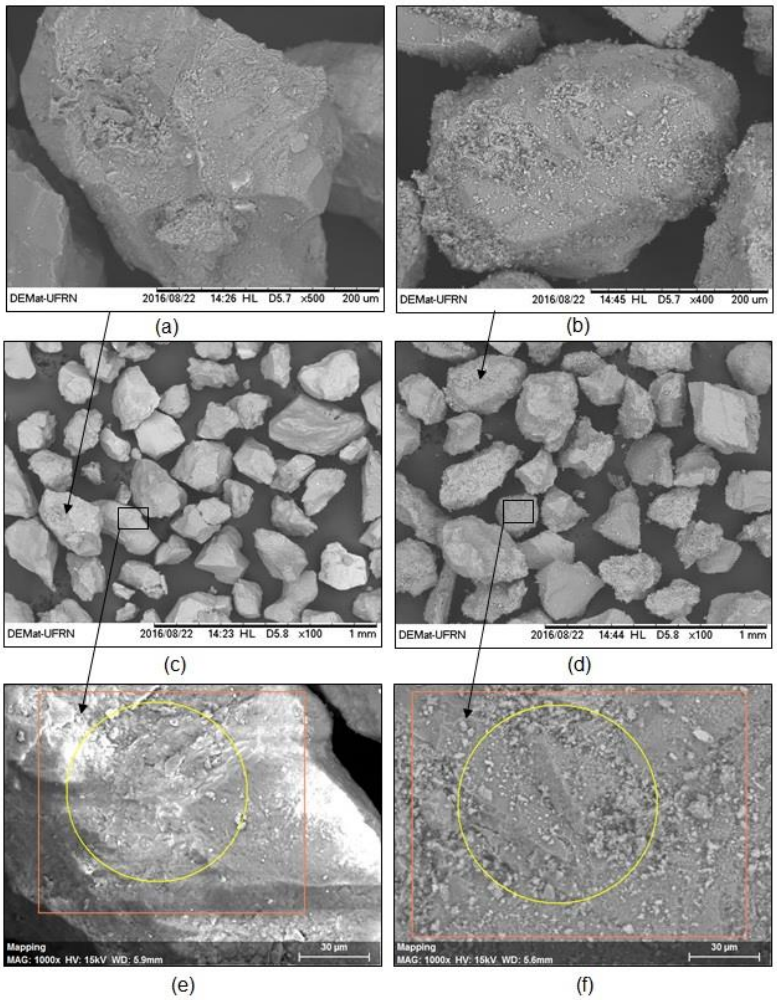
Observou-se a forma e textura dos agregados, através de imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com níveis de ampliação de 100 a 500

vezes, a partir de grãos retidos na peneira de malha 0,15 mm e menores que 0,075 mm para o AN e ARCF 1, respectivamente.

Constatou-se nas Figuras 4.11 (a) e (c) que o AN apresenta formas irregulares, arrestas levemente arredondadas e textura superficial aparentemente compacta, corroborando com a descrição de Evangelista *et al.* (2015) para o agregado fino proveniente da areia de rio.

Já no ARCF 1 (< 0,075 mm), é marcante a presença de microfinos aderidos ao grão, observados nas Figuras 4.11 (b) e (d). Isso ocorre devido ao processo de britagem do agregado que gera uma maior quantidade de finos (HEINECK, 2012).

Figura 4.11 - Morfologia e textura dos agregados - (a) e (c) do AN; (b) e (d) do ARCF 1; (e) e (f) indicação da região onde foi realizado o EDS para o AN e ARCF



De igual modo ao AN, o ARCF 1 apresenta formas irregulares, porém com arestas definidas e texturas variadas (compactas e porosas). Essa característica

relaciona-se com as diferentes composições dos grãos que podem compreender partículas de agregado graúdo natural, rodeado totalmente ou parcialmente por uma camada de argamassa e/ou pasta de cimento, conforme já discutido na seção 4.2.1 dessa dissertação.

As Figuras 4.13 (e) e (f) ilustram a região de avaliação qualitativa dos elementos presentes no AN e ARCF 1, respectivamente, por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Constatou-se que a sílica (51,61 e 41,31%) é o elemento mais presente no AN e ARCF, respectivamente, seguidos do alumínio (35,03%, no AN) e do cálcio (33,61%, no ARCF). Também é marcante a presença de alumínio no ARCF 1 (14,76%) que pode estar associado ao sulfoaluminato de cálcio presente em compostos cimentícios não hidratados e aos argilominerais no AN (COSTA *et al.* 2010).

Em menores porções estão o ferro (10,73%) e potássio (2,62%), para o AN, e o sódio (5,32%), ferro (2,74%), potássio (1,82%) e magnésio (0,45%), no ARCF 1.

4.2.6 Índice de reatividade

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados das resistências médias à compressão das argamassas avaliadas com o cimento e com a cal.

Observa-se que o ARCF 1 apresentou baixa reatividade com o cimento, visto que a resistência média à compressão da argamassa com ARCF (27,12 MPa) foi equivalente a 81% da resistência da argamassa de referência (33,43 MPa). De igual modo, o desempenho com a cal (0,5 MPa) aos 7 dias, também foi baixo.

Observou-se que o ARCF 1 não influenciou no sistema como uma pozolana. Todavia, a aparente reatividade pode ter sido promovida por anidros do cimento ao se hidratar e pela melhoria no empacotamento dos grãos inertes.

Tabela 4.8 – Reatividade do ARCF em argamassas de cimento e cal

Argamassa	IR com cimento Portland			IR com cal		
	RC (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	RC (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
REF	33,43	3,06	9,14	-	-	-
ARCF 1	27,12	3,52	12,99	0,50	0,01	1,51

DP = Desvio padrão; ARCF 1 = Argamassa com resíduo de concreto; REF = Argamassa de Referência

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Demostra-se na Tabela 4.9 as propriedades das argamassas no estado anidro, determinadas a partir dos ensaios de granulometria (módulo de finura, coeficiente de uniformidade e teor de finos < 75 μm) e massa unitária, bem como no estado plástico determinadas a partir dos ensaios de índice de consistência que definiu o consumo de água (relação água/materiais secos) e a densidade de massa aparente.

Essas propriedades das argamassas serão discutidas nas seções 4.3.1.1, 4.3.1.2, 4.3.2.1 e 4.3.2.1, dessa dissertação.

Tabela 4.9 – Propriedades das argamassas nos estados anidro e plástico

Argamassa	Estado anidro				Estado plástico	
	Módulo de finura	Coef. de Uniformidade	Teor de finos < 75 μm (%)	Massa unitária (g/cm³)	a/ms	Densidade de massa (g/cm³)
0,5C 25S	2,30	6,57	14,94	1,43	0,207	1,97
1,5C 25S	2,35	5,48	11,91	1,40	0,213	1,96
0,5C 75S	2,66	12,11	18,38	1,38	0,212	1,95
1,5C 75S	2,79	10,43	14,81	1,34	0,218	1,95
0,3C 50S	2,42	9,12	17,64	1,46	0,201	1,97
1,7C 50S	2,54	7,64	13,80	1,41	0,211	1,97
1,0C 14,7S	2,22	5,00	12,73	1,46	0,207	1,97
1,0C 85,3S	2,76	11,29	16,29	1,40	0,214	1,96
1,0C 50S	2,49	7,53	14,65	1,42	0,212	1,97
1,0C 50S	2,45	7,57	15,04	1,42	0,212	1,97
1,0C 50S	2,45	7,67	15,20	1,42	0,214	1,98
R 0,3	2,04	6,32	17,20	1,50	0,192	1,96
R 0,5	2,06	6,14	16,51	1,49	0,196	1,95
R 1,0	2,09	5,81	15,32	1,48	0,203	1,96
R 1,5	2,11	5,61	14,60	1,48	0,205	1,96
R 1,7	2,11	5,54	14,40	1,47	0,211	1,95

Demonstra-se na Tabela 4.10 a matriz de planejamento e os resultados observados experimentalmente em cada combinação de nível, sendo os dados processados no Software Statistica, versão 7.0.

Optou-se por avaliar os resultados a 95 % de confiança, conforme estudos realizados por Ledesma *et al.* 2014; Martínez *et al.* 2016;

Para cada resposta, uma modelagem inicial foi realizada verificando-se os efeitos dos fatores sobre as respostas (variáveis dependentes) e na sequência, ajustou-se o modelo apenas com os fatores significativos (p-valor < 0,05).

Tabela 4.10 – Matriz de planejamento

Argamassa	Variáveis independentes		Variáveis dependentes			
	Cal/Cim	TS (%)	CAP_{28d} ($g/dm^2.min^{1/2}$)	RC_{28d} (MPa)	RT_{28d} (MPa)	RAD_{56d} (MPa)
0,5C 25S	0,5	25	11,4	6,5	1,8	0,7
1,5C 25S	1,5	25	21,4	2,4	0,7	0,4
0,5C 75S	0,5	75	11,1	8,1	2,6	0,6
1,5C 75S	1,5	75	18,2	3,2	1	0,4
0,3C 50S	0,3	50	7,8	9,7	3,1	0,6
1,7C 50S	1,7	50	18,6	2,8	0,8	0,4
1,0C 14,7S	1,0	14,7	17,9	3,5	1	0,4
1,0C 85,3S	1,0	85,3	14,3	4,7	1,5	0,5
1,0C 50S	1,0	50	14,9	4,2	1,6	0,3
1,0C 50S	1,0	50	15,8	4,2	1,6	0,3
1,0C 50S	1,0	50	16,2	4,0	1,4	0,3

4.3.1 Avaliação no estado anidro

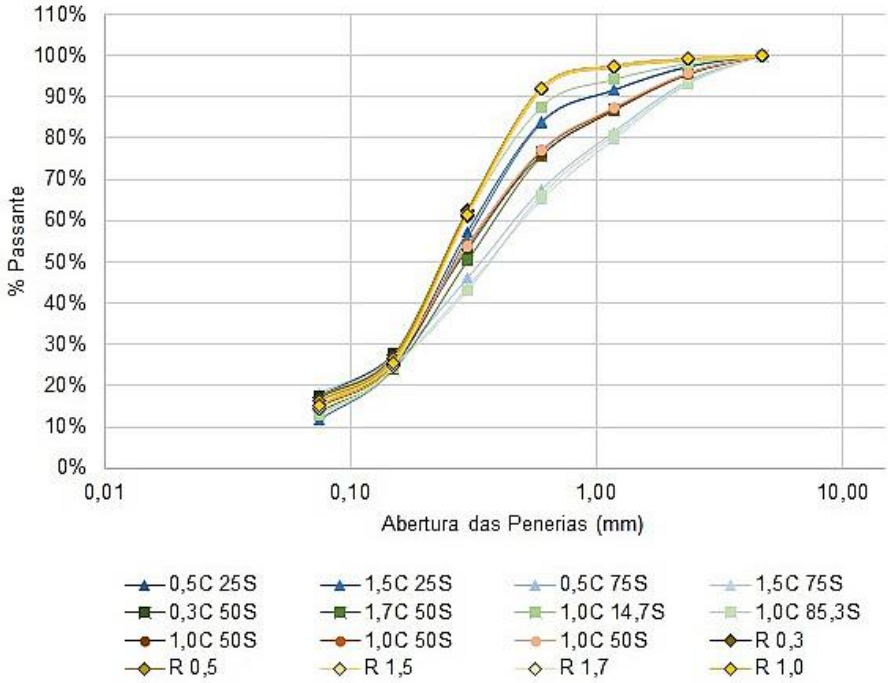
4.3.1.1 Distribuição granulométrica das argamassas

Observa-se na Figura 4.12 a formação de 4 agrupamentos de perfis granulométricos distintos, influenciados significativamente pelos agregados visto que compreendem 67% (em volume) da composição da argamassa.

As argamassas 0,5C 75S; 1,5C 75S e 1,0C 85,3S apresentaram perfis granulométricos praticamente sobrepostos com distribuição contínua. De igual modo ocorre nas argamassas 0,3C 50S; 1,7C50S e 1,0C 50S, porém com distribuição dos grãos menos contínua.

Já as argamassas 0,5C 25S e 1,5C 25S, com perfis sobrepostos, e 1,0C 14,7S mais se aproximaram das argamassas de referência (R 0,3; R0,5; R1,0; R1,5 e R1,7) que apresentaram distribuições granulométricas uniformes.

Figura 4.12 - Distribuição granulométrica das argamassas com ARCF e de referência



As argamassas com baixos (14,7 e 25%) e elevados (75 e 85,3%) teores de substituição do AN por ARCF apresentaram módulo de finura variando de 2,22 a 2,35 e 2,66 a 2,79, respectivamente.

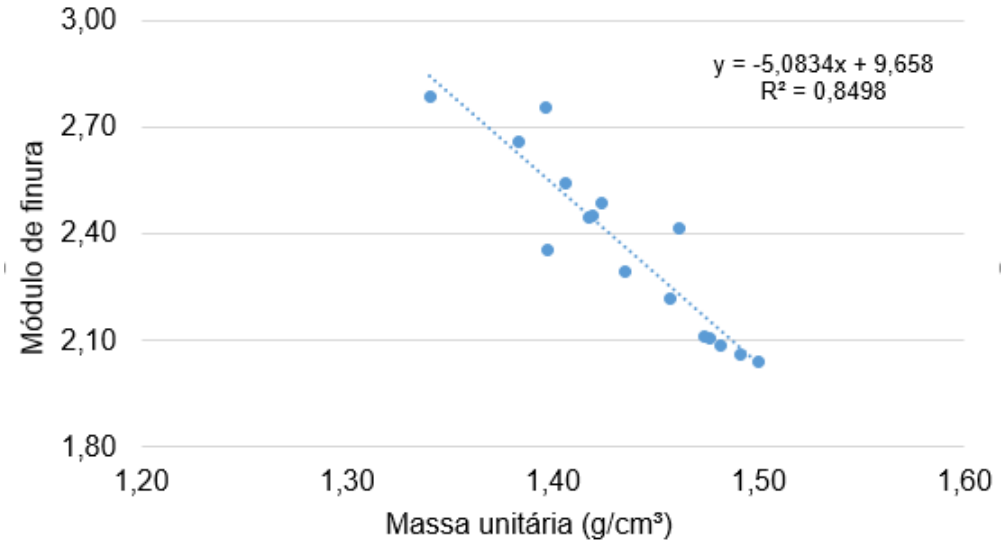
Comportamento semelhante ao módulo de finura, observa-se na variação do coeficiente de uniformidade que ocorre de 5,00 a 6,57 e 10,43 a 12,11 para as argamassas com baixos e elevados teores de substituição do AN por ARCF, respectivamente. Segundo entendimento de Caputo (2008) todas as argamassas foram classificadas como de uniformidade média ($5,0 \leq Cu \geq 15,0$).

4.3.1.2 Massa unitária

As massas unitárias das argamassas são influenciadas pela substituição do AN por ARCF através de uma relação inversa, ou seja, quanto maior a quantidade de ARC menor será a massa unitária.

Observa-se na Figura 4.13 que a relação entre módulo de finura versus massa unitária apresenta forte correlação linear, aproximadamente 85%.

Figura 4.13 - Relação módulo de finura *versus* massa unitária



Constatou-se uma variação na massa unitária das argamassas com baixos e elevados teores de substituição do AN por ARCF na ordem de 1,40 a 1,46 e 1,34 a 1,40, respectivamente (ver Tabela 4.5). Isso ocorre devido a massa específica do ARCF ser menor em relação ao AN.

4.3.2 Avaliação no estado plástico

4.3.2.1 Índice de consistência das argamassas

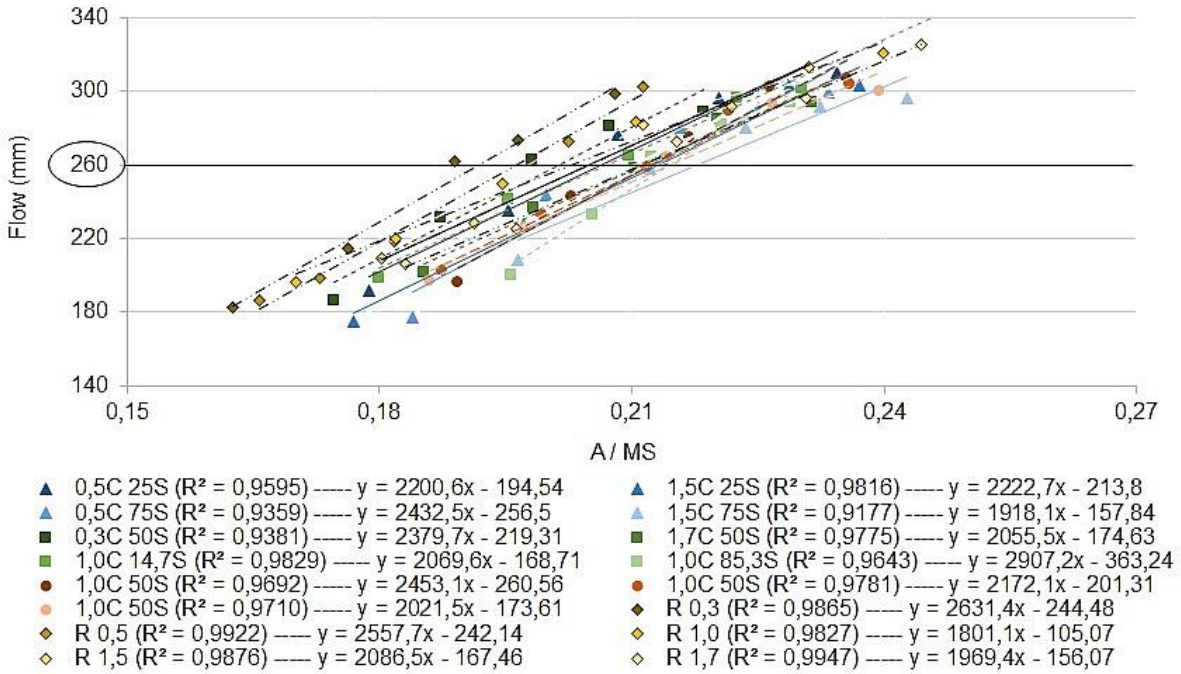
Observa-se na Figura 4.14 que o procedimento para determinar a consistência da argamassa com adição gradativa de água apresenta forte correlação linear, uma

vez que os coeficientes (R^2) variaram de 0,9177 a 0,9829 e de 0,9827 a 0,9947 para as argamassas com ARCF e de referência, respectivamente.

As argamassas com ARCF apresentam maiores consumos de água frente às argamassas de referência.

Ao comparar as relações a/ms das argamassas cujas variáveis independentes estão nos limites inferior (0,5C 25S) e superior (1,5C 75S), observa-se uma variação de 0,207 a 0,218, respectivamente. Isso acarreta um aumento no consumo de água de 5,31%, o que nas argamassas de referência ocorre em 9,90% ao comparar as relações a/ms das argamassas R 0,3 (0,192) e R 1,7 (0,211).

Figura 4.14 - Relação índice de consistência *versus* a/ms



4.3.2.2 Densidade de massa

Ao comparar os grupos de argamassas, com mesma relação cal/cim e diferentes taxas de substituição do AN por ARCF: 0,5C 25S (1,97 g/cm³), 0,5C 75S (1,95 g/cm³), 1,0C 14,7S (1,97 g/cm³) e 1,0C 85,3S (1,96 g/cm³), observa-se uma tendência para a densidade de massa ser inversamente proporcional à taxa de

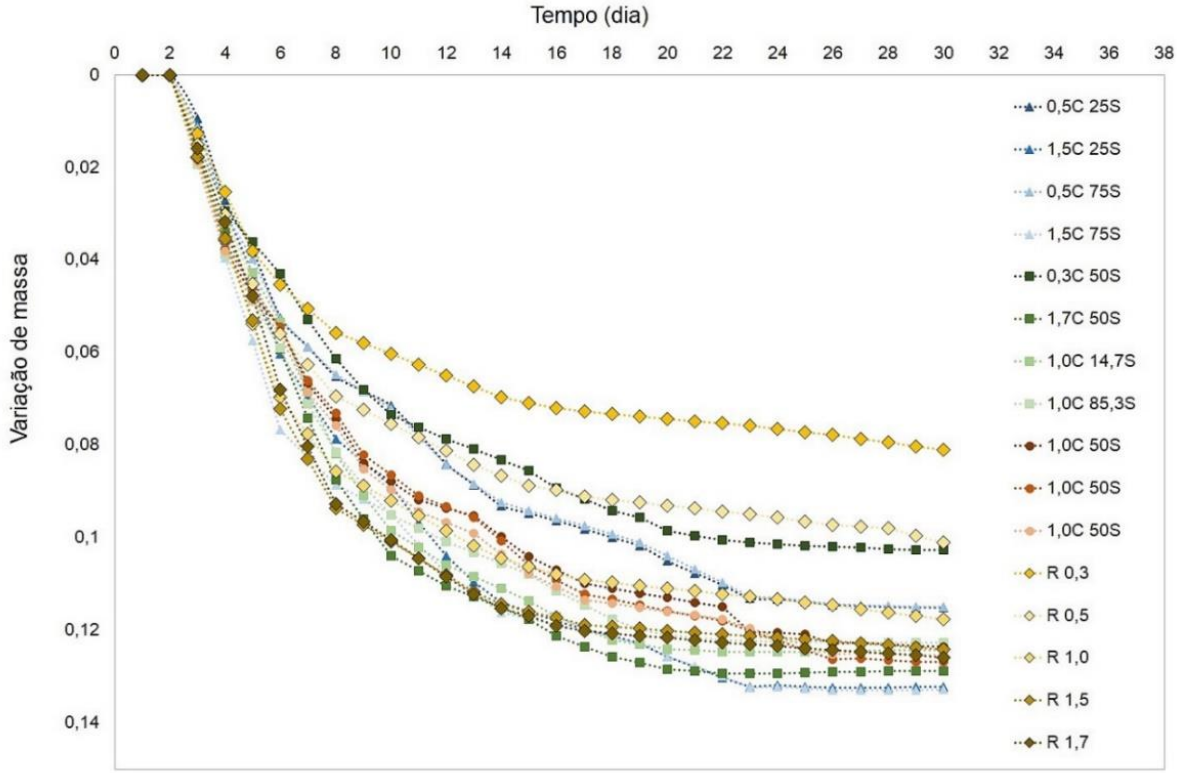
substituição do resíduo, visto que o ARCF apresenta menor massa unitária quando comparada ao AN.

4.3.3 Avaliação no estado endurecido

4.3.3.1 Variação de massa

De acordo com os resultados expressos na Figura 4.15, observa-se um comportamento semelhante entre as argamassas com ARCF e de referência quanto à variação de massa ao longo do tempo, porém com 4 agrupamentos de intervalos diferentes aos 30 dias: de 0 a - 0,08 (R 0,3), 0 a - 0,10 (R 0,5; 0,3C 50S), 0 a - 0,12 (R 1,0; R1,5; 0,5C 25S; 0,5C 75S; 1,0C 14,7S; 1,0C 85,3S) e 0 a -0,13 (R 1,7; 1,0C 50S; 1,7C 50S; 1,5C 25S; 1,5C 75S).

Figura 4.15 - Variação de massa ao longo do tempo



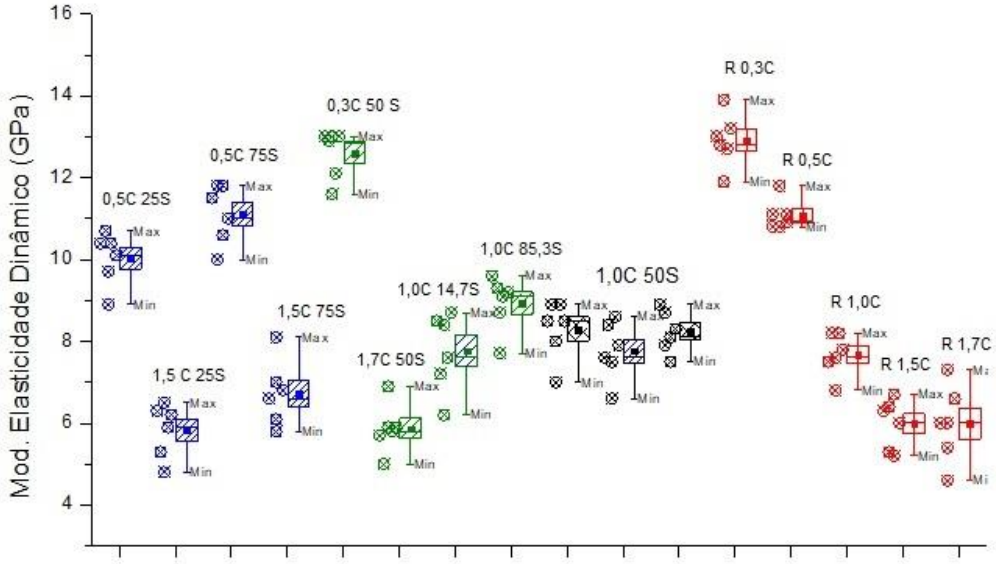
Nas argamassas de referência cujos perfis granulométricos são uniformes a variação de massa aumenta de forma proporcional ao acréscimo da cal que por sua vez, aumenta a demanda de água na mistura devido a elevada área superficial da cal (3,69 m²/g), sendo 329% maior que a do cimento (1,12 m²/g). Observa-se que a menor (-0,08) e maior (-0,13) variação de massa ocorreram nas argamassas R 0,3 e R 1,7, respectivamente.

Nas argamassas com ARCF cujos perfis granulométricos variam de contínuos a uniformes a variação de massa é influenciada, além da cal, pelo ARCF que absorve mais água quando comparado ao AN e perfil granulométrico contínuo, ambos dificultando a perda de água por evaporação.

4.3.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Observa-se na Figura 4.16 uma relação diretamente proporcional entre o módulo de elasticidade dinâmico (MED) e o consumo de cimento nas argamassas, ou seja, as argamassas no nível inferior da variável independente relação cal/cim (0,3C 50S; 0,5C 75S; 0,5C 25S) apresentaram os maiores valores que variaram de 12,6 a 10,0 GPa, respectivamente.

Figura 4.16 - Módulo de elasticidade dinâmico

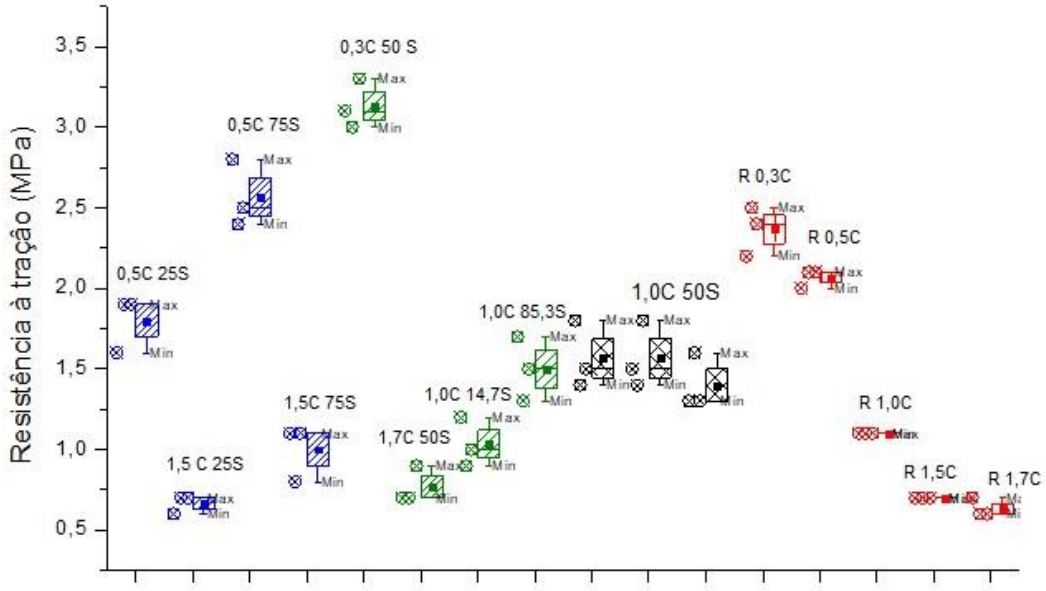


Ao comparar as argamassas com relação cal/cim no ponto central e variações na taxa de substituição do AN por ARCF (1,0C 14,7S; 1,0C 50S; 1,0C 85,3S), observou-se os módulos iguais a 7,8; 8,1 e 8,9, respectivamente. Desse modo, o ARCF assim como o cimento contribuíram para o aumento na rigidez das argamassas.

4.3.3.3 Resistências à tração na flexão e compressão

Observa-se na Figuras 4.17 e 4.19 que o comportamento das argamassas para a resistência à tração e compressão assemelha-se aos resultados do módulo de elasticidade dinâmico, ou seja, as argamassas no nível inferior da variável independente relação cal/cim (0,3C 50S; 0,5C 75S; 0,5C 25S) apresentaram os maiores valores para as resistências à tração e compressão que variaram de 3,1 a 1,8 MPa e 9,7 a 6,5 MPa, respectivamente.

Figura 4.17 - Resistência à tração na flexão



Observa-se na Tabela 4.11 os coeficientes do modelo de regressão com termos lineares e quadráticos associados às letras L e Q, respectivamente. Os fatores com p - valores menores que 5 % ($p < 0,05$) são considerados significativos no processo.

Observa-se que o termo quadrático para a taxa de substituição do AN por ARC ficou levemente acima do nível de significância a 95 % (p-valor = 0,058365), mesmo

assim o fator foi incorporado ao modelo matemático, expresso na Equação 4.1, por influenciar significativamente no processo.

Tabela 4.11 – Coeficientes de regressão para a resposta de resistência à tração

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(5)	p-valor	Estimativas por intervalo (95%)	
					Limite inferior	Limite Superior
Média	2,69666	0,406332	6,63659	0,000565	1,70240	3,69092
(1)Cal / Cim(L)	-3,03096	0,575291	-5,26857	0,001886	-4,43865	-1,62328
Cal / Cim(Q)	0,76801	0,281618	2,72712	0,034317	0,07891	1,45710
(2)TS (%)(L)	0,03497	0,011351	3,08039	0,021652	0,00719	0,06274
TS (%)(Q)	-0,00026	0,000111	-2,33344	0,058365	-0,00053	0,00001

$$RT_{28d} = 2{,}70 - 3{,}03\frac{Cal}{Cim} + 0{,}77\left(\frac{Cal}{Cim}\right)^2 + 0{,}04\,\mathrm{TS} - 0{,}0003\,(\mathrm{TS})^2 \qquad (4.1)$$

Observa-se na ANOVA apresentada na Tabela 4.12 que o modelo matemático (Equação 4.1) descrito para a variável dependente RT_{28d} em função das variáveis independentes (relação cal/cim e taxa de substituição do AN por ARC), com parâmetros estatisticamente significativos, pode ser considerado adequado, visto que a porcentagem de variação explicada (R^2) é de 97,03 % e que o teste F é altamente significativo, por resultar no F calculado (48,98) equivalente a 10,8 vezes o F tabelado (4,534), sendo o modelo adequado para descrever os resultados através da superfície de resposta (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

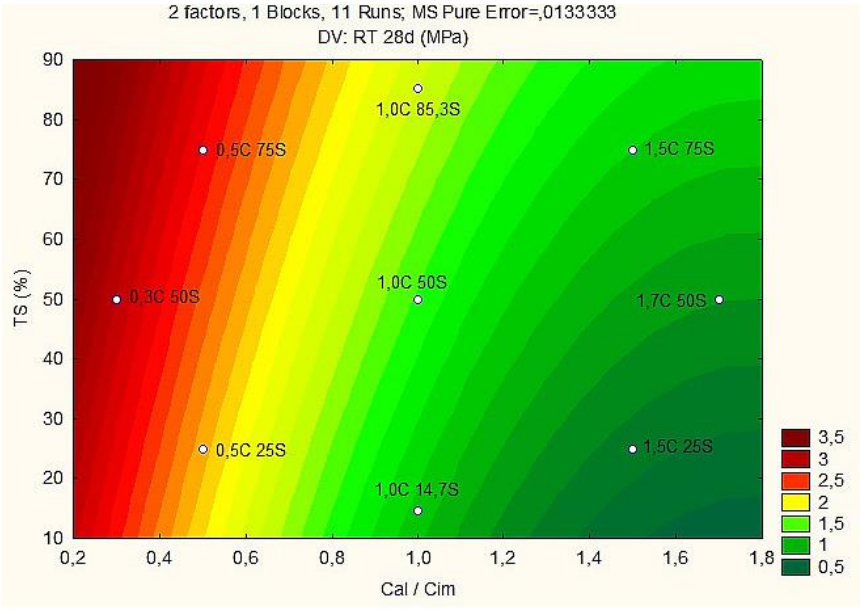
Tabela 4.12 – ANOVA para a resistência à tração

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	5,32	4	1,33	48,98
Resíduos	0,16	6	0,03	
Total	5,49	10		

% de variação explicada (R^2) = 97,03; $F_{0,95\,;\,4;\,6}$ = 4,534

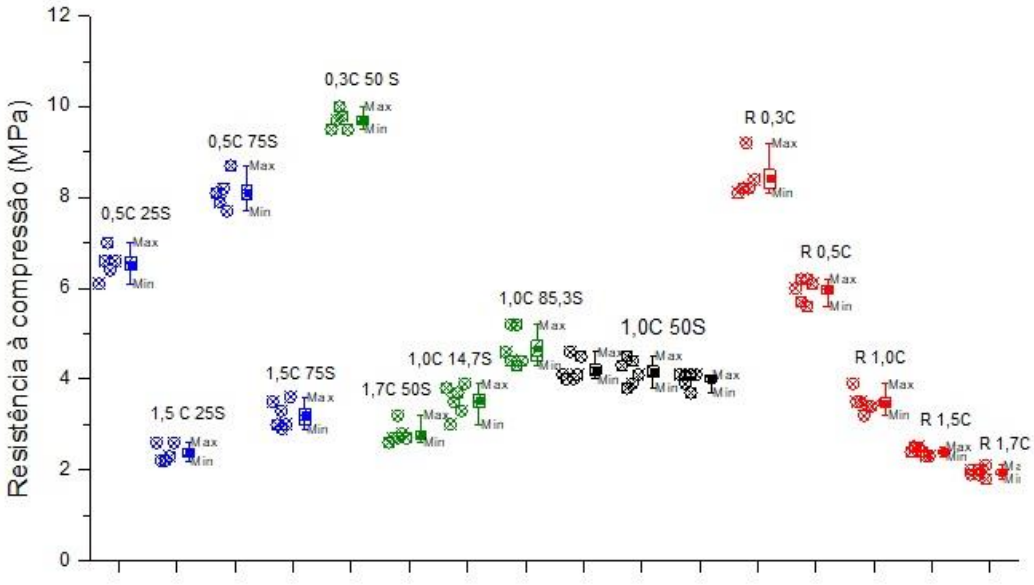
A partir da superfície de resposta apresenta na Figura 4.18 observa-se que a redução na relação cal/cim conduzem ao aumento da resistência à tração.

Figura 4.18 - Superfície de resposta para a resistência à tração na flexão



O contrário ocorre com a taxa de substituição do AN por ARC que aumenta o desempenho mecânico das argamassas em relação à resistência à tração.

Figura 4.19 - Resistência à compressão



Observa-se na Tabela 4.13 que os fatores são altamente significativos, sendo todos com p-valores menores que 0,0005, demonstrando elevada influência no processo representado pelo modelo matemático, expresso na Equação 4.2.

Tabela 4.13 – Coeficientes de regressão para a resposta de resistência à compressão

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(5)	p-valor	Estimativas por intervalo (95%)	
					Limite inferior	Limite Superior
Média	12,0006	0,405491	29,5952	0,000000	11,0418	12,9594
(1)Cal / Cim(L)	-13,1712	0,797700	-16,5115	0,000001	-15,0574	-11,2849
Cal / Cim(Q)	4,2295	0,389758	10,8517	0,000012	3,3079	5,1512
(2)TS (%)(L)	0,0205	0,003373	6,0795	0,000501	0,0125	0,0285

$$RC_{28d} = 12{,}00 - 13{,}17\frac{Cal}{Cim} + 4{,}23\left(\frac{Cal}{Cim}\right)^2 + 0{,}02\ \mathrm{TS} \qquad (4.2)$$

Observa-se na ANOVA apresentada na Tabela 4.14 que o modelo matemático (Equação 4.2) descrito para a variável dependente RC_{28d} em função das variáveis estudadas, com parâmetros estatisticamente significativos, pode ser considerado adequado, visto que a porcentagem de variação explicada (R^2) é de 99,25 % e que o teste F é altamente significativo, por resultar no F calculado (309,65) equivalente a 71,2 vezes o F tabelado (4,347).

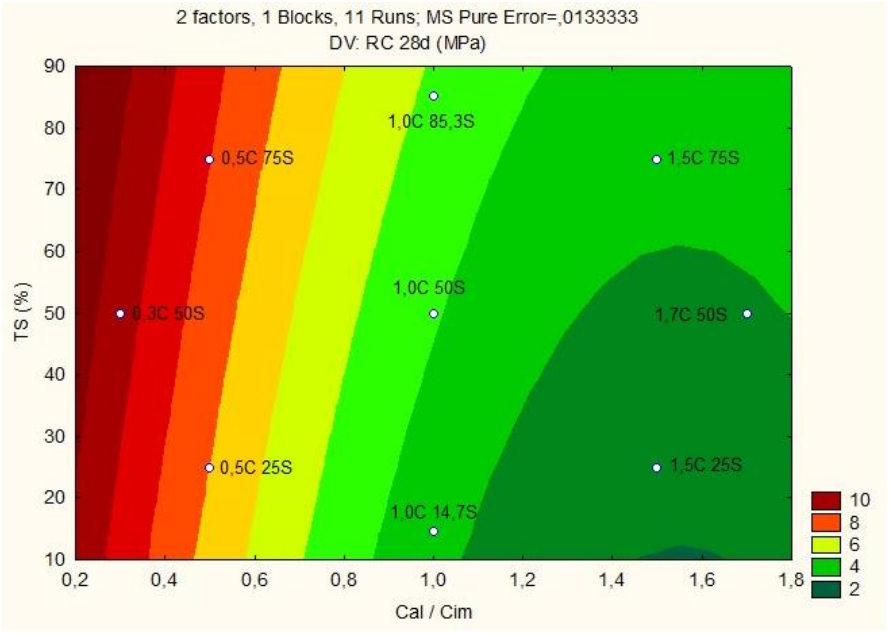
Tabela 4.14 – ANOVA para a resistência à compressão

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	52,75	3	17,58	309,65
Resíduos	0,40	7	0,06	
Total	53,15	10		

% de variação explicada (R^2) = 99,25; $F_{0,95\ ;\ 3;\ 7}$ = 4,347

Semelhante à resistência à tração, observa-se na superfície de resposta apresenta na Figura 4.20 que as baixas relações cal/cim e aumento do ARCF conduzem ao aumento da resistência à compressão.

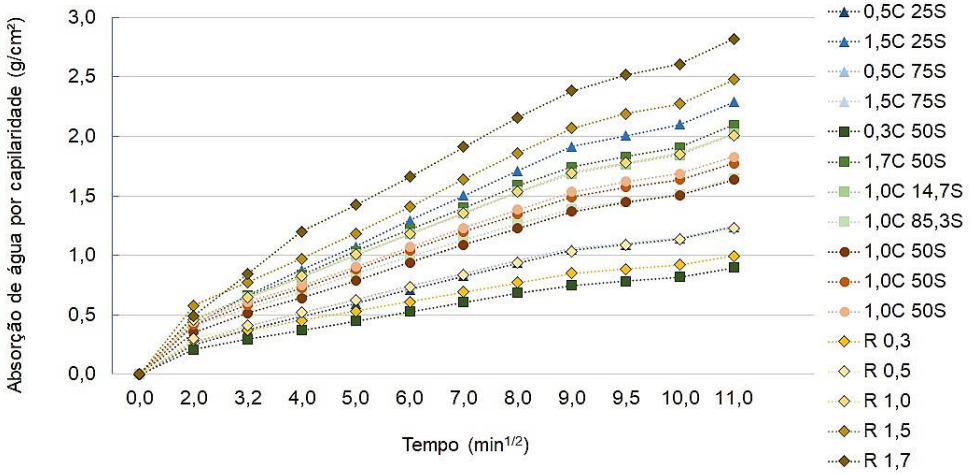
Figura 4.20 - Superfície de resposta para a resistência à compressão



4.3.3.4 Coeficiente de capilaridade

Observa-se na Figura 4.21 que as argamassas com 50 % de substituição do AN por ARC (0,3C 50S e 1,7C 50S) apresentaram a maior (18,6 g/dm². $min^{1/2}$) e menor (7,8 g/dm². $min^{1/2}$) absorção de água por capilaridade, respectivamente.

Figura 4.21 - Absorção de água por capilaridade



Observa-se na Tabela 4.15 que os fatores são altamente significativos, sendo todos com p-valores menores que 0,023, demonstrando elevada influência no processo representado pelo modelo matemático, expresso na Equação 4.3.

Tabela 4.15 – Coeficientes de regressão para a resposta coeficiente de capilaridade

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(5)	p-valor	Estimativas por intervalo (95%)	
					Limite inferior	Limite Superior
Média	5,50454	1,633430	3,36993	0,011922	1,64209	9,36699
(1)Cal / Cim(L)	17,26959	3,213352	5,37432	0,001037	9,67122	24,86796
Cal / Cim(Q)	-4,56661	1,570052	-2,90857	0,022707	-8,27920	-0,85403
(2)TS (%)(L)	-0,04298	0,013586	-3,16381	0,015844	-0,07511	-0,01086

$$CAP_{28d} = 5{,}51 + 17{,}27\frac{Cal}{Cim} - 4{,}57\left(\frac{Cal}{Cim}\right)^2 - 0{,}04\,\mathrm{TS} \quad (4.3)$$

Observa-se na ANOVA apresentada na Tabela 4.16 que o modelo matemático (Equação 4.3) descrito para a variável dependente CAP_{28d} em função das variáveis estudadas, com parâmetros estatisticamente significativos, pode ser considerado adequado, visto que a porcentagem de variação explicada (R^2) é de 95,83 % e que o teste F é altamente significativo, por resultar no F calculado (53,57) equivalente a 12,3 vezes o F tabelado (4,347).

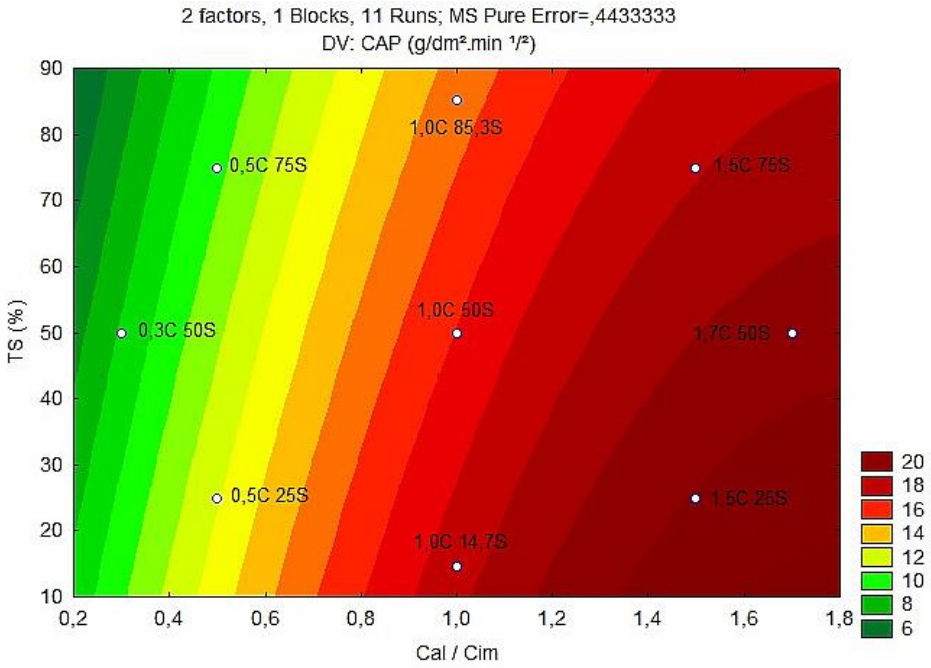
Tabela 4.16 – ANOVA para o coeficiente de capilaridade

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	148,10	3	49,37	53,57
Resíduos	6,45	7	0,92	
Total	154,55	10		

% de variação explicada (R^2) = 95,83; $F_{0,95\ ;\ 3;\ 7}$ = 4,347

Observa-se a partir da análise da superfície de resposta apresenta na Figura 4.22 que as elevadas relações cal/cim e baixo consumo do ARC conduzem ao aumento da absorção de água por capilaridade.

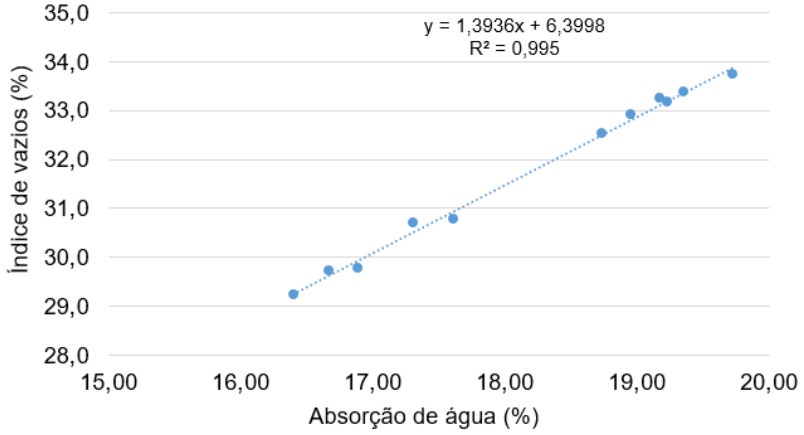
Figura 4.22 - Superfície de resposta para absorção de água por capilaridade



4.3.3.5 Absorção de água e índice de vazios

Observa-se na Figura 4.23 que a absorção de água por imersão e índice de vazios apresentam forte correlação linear (R^2 = 0,995), visto que as argamassas 1,5C 75S e 0,5C 25S apresentaram as maiores (19,73 e 33,73 %) e menores (16,40 e 29,24 %) esses parâmetros, respectivamente.

Figura 4.23 - Absorção de água *versus* Índice de vazios



4.3.4 Avaliação de desempenho

4.3.4.1 Trabalhabilidade

O tempo de aplicações das argamassas variaram entre 4 e 6 minutos, sendo 50% do tempo dedicado à etapa de preenchimento e a outra metade dedicada ao acabamento (sarrafeamento e desempolamento). Não foram observadas diferenças significativas entre os tempos de aplicação das argamassas de referência e com ARCF, sendo influenciado, de certo modo, pelo tamanho reduzido dos painéis de revestimento com dimensões de 40 x 60 cm.

Como era de se esperar os critérios de brilho, plasticidade e trabalhabilidade foram considerados aplicáveis, visto que foram padronizadas as relações ligante/agregado e a consistência nas argamassas.

Observa-se na avaliação qualitativa do pedreiro Francisco das Chagas, com 15 anos de experiência na função, que as argamassas com elevada taxa de substituição do AN por ARCF (75 e 85,3%), mesmo apresentando plasticidade adequada promoveram superfície áspera o que foi evidenciado pelos seguintes comentários:

> *"Semelhante à massa com areia grossa. Tem ótima aderência. É mais difícil de dar acabamento. Boa para contra-piso",* (referindo-se à argamassa 0,5C 75S);
>
> *"Material grosso. É difícil o sarrafeamento e acabamento. Semelhante a uma textura",* (referindo-se à argamassa 1,0C 85,3S).
>
> *"Semelhante ao 3",* (referindo-se a arg. 0,5C 75S).

Ressalta-se que o aspecto áspero das argamassas com elevados teores de substituição do AN por ARCF, relatado pelo pedreiro, pode restringir a aplicação do material em revestimentos argamassados com acabamento final em pintura.

Além disso, é necessário investigar a aderência de revestimentos cerâmicos aplicados sobre o substrato áspero do reboco com resíduo de concreto, pois os grãos

superficiais do ARCF contêm pasta de cimento e podem desagregar com o movimento da desempenadeira para aplicação da argamassa colante.

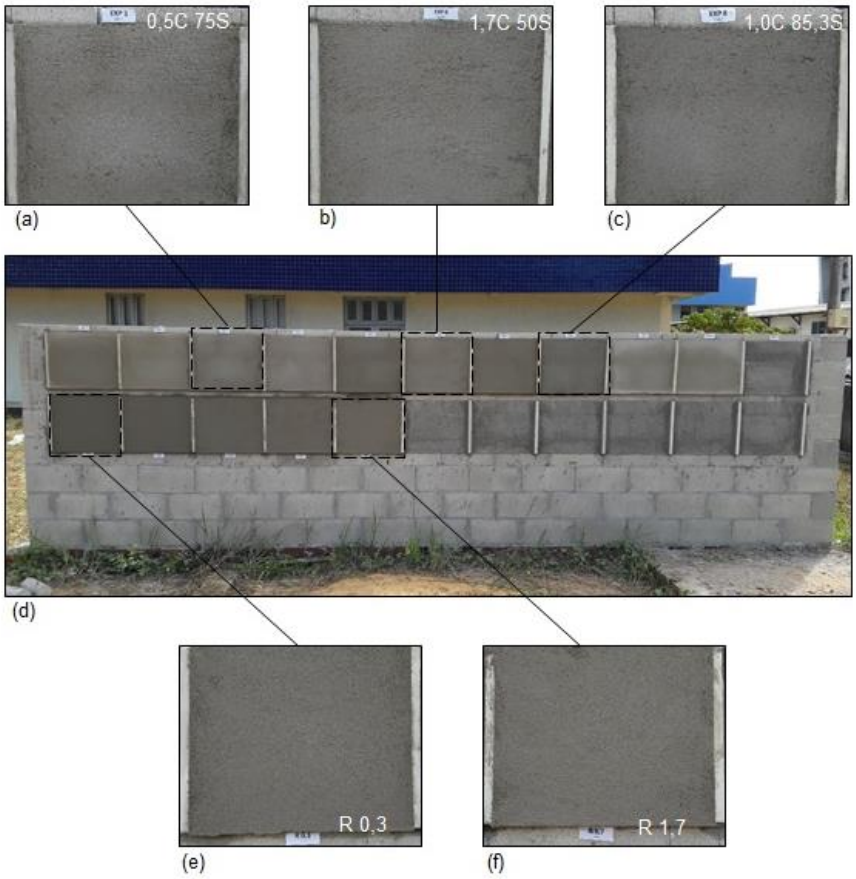
Na Tabela 4.17 são apresentados os tempos de aplicação das argamassas e respectivos comentários do pedreiro sobre a trabalhabilidade das misturas.

Tabela 4.17 – Avaliação qualitativa da trabalhabilidade das argamassas

Argamassa	Tempo de execução do painel (min)		Avaliação qualitativa do pedreiro	
	P	A	Brilho, plasticidade e trabalhabilidade	Comentário
0,5C 25S	4	2	Aplicável	“Melhor aderência no enchimento. Aparenta ser mais mole”
1,5C 25S	2	2	Aplicável	“Semelhante à primeira massa (referindo-se a arg. 0,5C 25S)”
0,5C 75S	3	3	Aplicável	“Semelhante à massa com areia grossa. Tem ótima aderência. É mais difícil de dar acabamento. Boa para contra-piso”
1,5C 75S	2	2	Aplicável	“Semelhante ao 3 (referindo-se a arg. 0,5C 75S)”
0,3C 50S	3	2	Aplicável	“Semelhante ao 1 e 2 (referindo-se às argamassas 0,5C 25S e 1,5C 25S)”
1,7C 50S	2	2	Aplicável	“ É mais difícil de fazer a cheia. Aparenta ter pouca água”
1,0C 14,7S	2	2	Aplicável	“ Foi a melhor massa para se trabalhar, ... até agora”
1,0C 85,3S	2	2	Aplicável	“ Material grosso. É difícil o sarrafeamento e acabamento. Semelhante a uma textura”
1,0C 50S	3	2	Aplicável	“ A massa está com boa consistência. Se tivesse um pouco mais de água, seria melhor”
R 0,3	3	2	Aplicável	“É mais difícil o manuseio. Muito bom de fazer o acabamento”
R 0,5	2	2	Aplicável	“Semelhante a massa anterior (referindo-se à argamassa R 0,3)”
R 1,0	2	2	Aplicável	“Boa aderência, plasticidade e acabamento”
R 1,5	3	2	Aplicável	“Boa aderência. Ótima textura. Ótima para manusear”
R 1,7	2	2	Aplicável	“Está com a plasticidade mais alta”

O aspecto áspero das argamassas com elevados teores de substituição do AN por ARCF é observado nas Figuras 4.24 (a), (b) e (c).

Figura 4.24 - Aspecto da superfície do reboco após acabamento



Observa-se nas Figuras 4.24 (d), (e) e (f) que as argamassas de referência com baixa e elevada relação cal/cim apresentam aspecto liso com ótimo acabamento superficial.

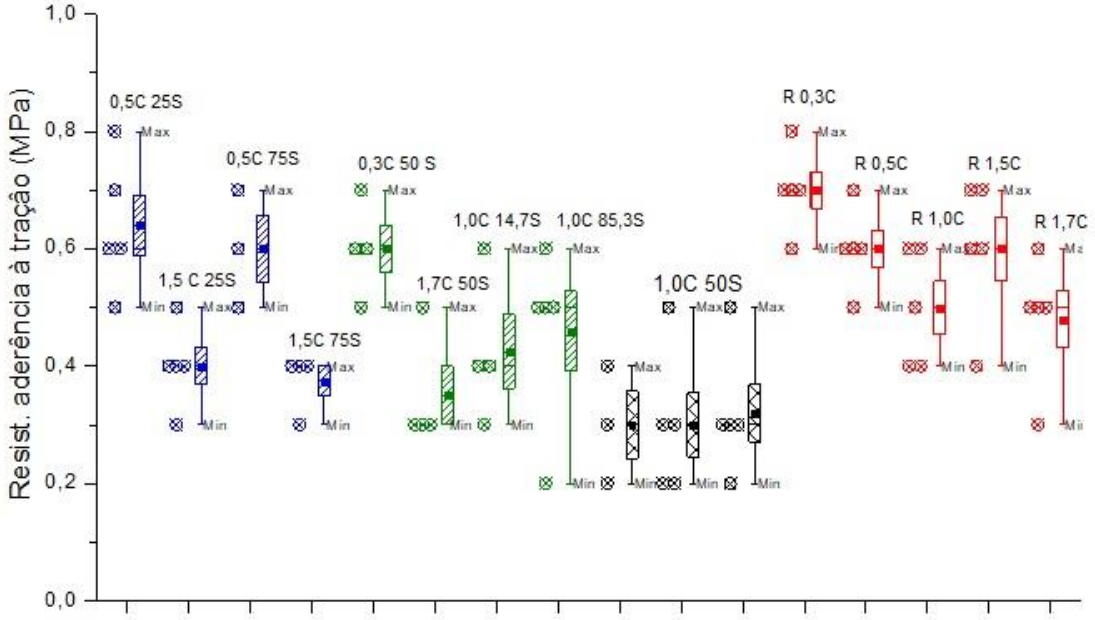
4.3.4.2 Índice de fissuração e resistência de aderência

O índice de fissuração é uma propriedade utilizada para avaliar a retração da argamassa durante o processo de secagem, sendo aferidas as extensões das aberturas por área do painel de revestimento.

Desse modo observou-se a cura dos painéis por 56 dias, em período chuvoso, constatando-se apenas uma fissura com extensão de 0,1 m, após 3 horas de aplicação da argamassa, no painel (0,4 x 0,6 m) 0,5C 75S, o que resultou em um índice de fissuração igual a 0,42 m/m².

Observa-se na Figura 4.25 a maior (0,7 MPa) e menor (0,3 MPa) resistência de aderência à tração nas argamassas 0,5C 25S e 1,0C 50S, respectivamente.

Figura 4.25 - Resistência de aderência à tração



Observa-se na Tabela 4.18 que o termo quadrático para a taxa de substituição do AN por ARC ficou acima do nível de significância a 95 % (p-valor = 0,558188), desse modo o fator foi excluído do modelo matemático, expresso na Equação 4.4.

Tabela 4.18 – Coeficientes de regressão para a resposta de resistência de aderência

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(5)	p-valor	Estimativas por intervalo (95%)	
					Limite inferior	Limite Superior
Média	0,915647	0,146293	6,25900	0,000420	0,56972	1,261574
(1)Cal/ Cim(L)	-0,920110	0,310228	-2,96592	0,020929	-1,65368	-0,186538
Cal/ Cim(Q)	0,361570	0,151591	2,38517	0,048512	0,00311	0,720026
TS Res (%)(Q)	0,000008	0,000013	0,61471	0,558188	-0,00002	0,000038

$$RAD_{56d} = 0{,}92 - 0{,}92\frac{Cal}{Cim} + 0{,}36\left(\frac{Cal}{Cim}\right)^2 \quad (4.4)$$

Observa-se na ANOVA apresentada na Tabela 4.19 que o modelo matemático (Equação 4.3) descrito para a variável dependente RAD_{56d} em função das variáveis estudadas, com apenas a relação cal/cim como parâmetro estatisticamente significativo, não pode ser considerado adequado, visto que a porcentagem de variação explicada (R^2) é de 66,29% e que o teste F apresenta baixa significância, por resultar no F calculado (7,87) equivalente a 1,8 vezes o F tabelado (4,459).

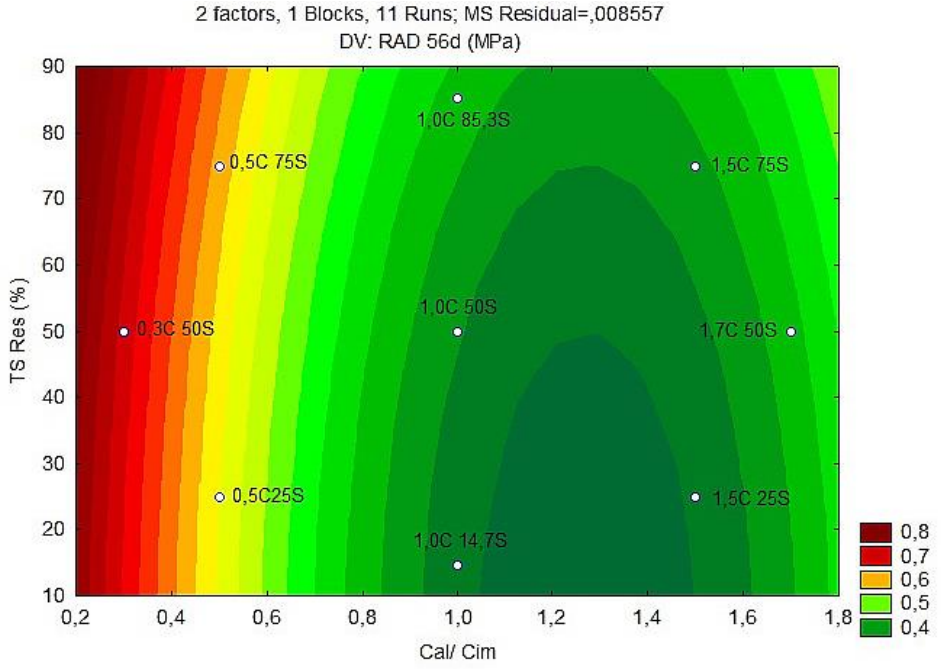
Tabela 4.19 – ANOVA para a resistência de aderência à tração

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	0,124140	2	0,062070	7,87
Resíduos	0,063132	8	0,007892	
Total	0,187273	10		

% de variação explicada (R^2) = 66,29; $F_{0,95\ ;\ 2;\ 8}$ = 4,459

Observa-se a partir da análise da superfície de resposta apresentada na Figura 4.26 que as baixas relações cal/cim conduzem ao aumento da resistência de aderência à tração.

Figura 4.26 - Superfície de resposta para resistência de aderência à tração



CAPÍTULO 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais observados no capítulo 4, expõe-se a seguir as principais conclusões sobre a influência da incorporação do agregado reciclado de concreto em argamassas de revestimento.

5.1.1 Análise dos ligantes e agregados

a) A cal apresentou área superficial 330% menor que o cimento, sendo a distribuição dos grãos médio do cimento equivalente à 8,45 μm (com 90% dos grãos inferiores a 17,32 μm), enquanto a cal possui distribuição das partículas com diâmetro médio de 5,32 μm, sendo 90% com diâmetro inferior a 10,63 μm.
b) O ARCF quando comparado ao AN, apresentou menores massas unitárias e específicas, porém com maior índice de vazios. Ocasionados principalmente pelo teor de argamassa aderido ao grão do ARC (em média 31%) e perfil granulométrico contínuo.
c) No ARCF, a absorção de água e a perda por abrasão Los Angeles que apresentam, entre si, correlação linear acima de 95% estão fortemente relacionadas com o teor de argamassa, constatados pelos elevados coeficientes R^2, ambos acima de 80%.
d) Quanto a distribuição granulométrica, o AN apresentou perfil uniforme com distribuição predominante na faixa de 0,15 a 0,30 mm. Já o ARCF caracteriza-se pelo perfil contínuo.
e) A quantidade de finos passantes na peneira de malha 75 μm do ARCF, com diâmetro médio de 33,53 μm, é 5 vezes maior do que a do AN com diâmetro médio das partículas em 61,80 μm.
f) Através da análise do FRX observou-se que os finos dos agregados reciclados possuem maiores teores de cálcio (CaO), silício (SiO_2), e ferro (Fe_2O_3), representando 85% da composição química, em média.

g) As principais fases cristalinas presentes no ARCF foram: a calcita ($CaCO_3$), a portandita ($Ca(OH)_2$) e silicatos oriundos do sistema de hidratação do cimento, além do quartzo (SiO_2) originário do agregado natural.
h) A fração do ARCF menor do que 75 μm apresentou baixa reatividade com a cal e com o cimento comprovando que o resíduo fino não atuou como pozolana no sistema, mas provavelmente pela hidratação de anidros do cimento e melhoria no empacotamento dos grãos inertes.

5.1.2 Caracterização no estado anidro

a) A mudança no perfil granulométrico foi influenciada significativamente pelos agregados, visto que compreendem 67% (em volume) da composição da argamassa, resultado em 4 grupamentos de perfis.
b) Houve redução da massa unitária na medida em que ocorreu a substituição do AN por ARCF, isto, por influência da alteração do módulo de finura da argamassa, constatada pela forte correlação linear, aproximadamente 85%, entre as duas variáveis.

5.1.3 Caracterização do estado plástico

a) O índice de consistência demonstrou um aumento do consumo de água quando o ARCF foi inserido na argamassa, resultando em 5,31% a mais de água na argamassa com maior substituição. Os valores do coeficiente de variação R^2 acima de 0,9 ratificam a confiança dos resultados apresentados.
b) A densidade da argamassa foi inversamente proporcional ao teor de substituição do AN por ARCF, visto que este apresenta menor massa unitária.

5.1.4 Caracterização no estado endurecido

a) A variação de massa nas argamassas com substituição do NA por ARCF apresentaram comportamento semelhante às argamassas de referência, contudo observou-se as maiores variações nas argamassas com elevados teores da cal, e consequentemente da água.

b) O ARCF e o cimento foram as variáveis que contribuíram para o aumento do módulo de elasticidade nas argamassas. Todavia, observou-se que a inserção da cal resultou na redução da rigidez das argamassas.
c) Os resultados de resistência tanto à tração quando à compressão apresentaram-se semelhantes ao módulo de elasticidade, em que as argamassas com maiores teores de ARCF e cimento apresentaram os valores mais elevados, conforme superfície de resposta apresentada. Os valores dos coeficientes e a ANOVA apresentados validaram estatisticamente os resultados obtidos.
d) O resultado de absorção por capilaridade apresentou resultados diferentes do esperado, sendo esta uma surpresa positiva quanto ao resíduo. Pela superfície de resposta pôde-se constatar que a absorção aumenta quando há um maior teor de AN e de forma mais acentuada com a elevação da relação cal/ cimento, sendo a cal a principal responsável pela elevação da absorção.

5.1.5 Trabalhabilidade e desempenho

a) As argamassas com ARCF apresentaram trabalhabilidade equivalente às argamassas de referência.
b) O aspecto superficial das argamassas com incorporação do ARCF foi mais áspero do que as argamassas de referência, restringindo o emprego em revestimentos argamassados, com teores de substituição do AN por ARCF acima de 50%, cujo acabamento final seja a pintura.
c) As argamassas não apresentaram fissuras até a idade de 56 dias, provavelmente pelo período chuvoso promovendo assim, a cura das argamassas.
d) A resistência de aderência das argamassas com ARCF foram menores do que as de referência, ainda assim atingindo o limite aceitável de 0,3 MPa para revestimentos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto o interesse da comunidade científica em aproveitar a fração fina do ARC, sugere-se investigar os seguintes temas em trabalhos futuros:

- Avaliar a contribuição dos aspectos morfológicos do ARCF sobre as propriedades das argamassas de revestimento;
- Avaliar o desempenho das argamassas com ARCF em idades elevadas;
- Investigar o comportamento das argamassas de revestimento com incorporação combinada de ARCF e adições minerais;
- Utilizar o planejamento experimental de misturas para otimizar o comportamento das argamassas com uso do ARCF;
- Investigar a resistência de aderência de placas cerâmicas em revestimento argamassado com uso do ARCF.

REFERÊNCIAS

AKBARNEZHAD, A.; ONG, K. C. G.; ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; FOO, T. W. J..Microwave assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials, 25 , 3469 – 3479, 2011.

AKBARNEZHAD, A.; ONG, K.C.G. Separation processes to improve the quality of recycled concrete aggregates (RCA). In: PACHECO-TORGAL, F.; TAM, V.W.Y.; LABRINCHA, J. A.; DING, Y.; BRITO, J. (Ed). Handbook of recyclied concrete and demolition waste. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, U.K, p. 246-269, 2013.

Akbarnezhad A , Ong K C G , Tam C T and Zhang M H (2013 a). Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates. Materials in Civil Engineering , DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000789 (25 January 25).

Akbarnezhad A , Ong K C G , Zhang M H and Tam C T (2013 b). Acid treatment technique for determining the mortar content of recycled concrete aggregates Testing and Evaluation, ASTM , doi: 10.1520/JTE20120026.

ALYAMAC, K. E.; GHAFARI, E.; INCE, R..Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. Journal of Cleaner Production. 2017; 144 : 192-202

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM: 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM: 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Ángeles". Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM: 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR: 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR: 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR: 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. 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: 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR: 15259: Argamassa 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: 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR: 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http:// http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305>. Acesso em: 25 mar. 2016.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n° 307, de 05 de julho de 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>. Acesso em: 25 mar. 2016.

BRAGA M, DE BRITO J, VEIGA R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. Construction and Building Materials. 2012;36:960–968.

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. 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.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C.. Planejamento de Experimentos usando o Statistica. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003. 260 p.

CAMPOS, M. de O.; CARASEK, H.; CASCUDO, O.; TEIXEIRA, F. de C.; OLIVEIRA, L.; PEDUZZI, M. L.. Uso de histogramas de frequência das profundidades de ruptura na análise de resultados de resistência de aderência de revestimentos de argamassa. In: XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA 2015). Porto Alegre: SBTA, 2015. 18 p.

CARASEK, H; ARAÚJO, R.C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. Revista Matéria. 2016; 21: 714-732.

CARTUXO, F.; de BRITO, J; EVANGELISTA, L; JIMENÉZ, J.; LEDESMA, E.. Durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates: influence of superplasticizers. Cement Concrete Composite. 2014; 29:397–401

CAPUTO, H.P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações., 6 ed., v.1, Rio de Janeiro, LTC, 2008.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. Construction and Building Materials. 2009; 23:289–294

COSTA, J. A.; MEXIAS, A. S.; GOMES, M. E. B.. Caracterização dos argilominerais usados em matéria-prima cerâmica, da formação Rio do Rasto, Bacia do Paraná, no município de Turvo, SC. Cerâmica. 2010; 56:360–367

EVANGELISTA, L.; de BRITO, J.. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement Concrete Composite. 2007; 29:397–401

EVANGELISTA, L.; GUEDES, M; de BRITO, J; FERRA, A. C.; PEREIRA, M.F.. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waster. Construction and Building Materials. 2015; 86:178–188

FAN, C.; HUANG, R; HWANG, H; CHAO, S.. Properties of concrete incorpotating fine recycled aggregates from crushed concrete waster. Construction and Building Materials. 2016; 112:708–715

GUACELLI, P. A. G.; RISSON, K. D. de S.; CARBONARI, B. M. T.. Substituição de areia de extração por areia de britagem para argamassa de revestimento. In: XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA 2015). Porto Alegre: SBTA, 2015. 17 p.

GHANBARI, M.; HADIAN, A.M.; NOURBAKHSH, A.A.; MACKENZIE, K.J.D.. Modeling and optimization of compressive strength and bulk density of metakaolin-based geopolymer using central composite design: A numerical and experimental study. Ceramics International. 2017; 43: 324-335.

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.

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.

JIMÉNEZ, J. R.; LEDESMA, E. F.; FERNÁNDEZ, J. M.; GALVÍN, A. P.; AGRELA, F.; BARBUDO, A.. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. 2014; 71:289-298.

JOHN, V. M.. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CARNEIRO, A. PP; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. (Org.). Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA / Caixa Econômica Federal, 2001. 312 p.

JOHN, V. M.. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2010. v.1. p. 97-121.

JUAN, M. S. de.; GUTIÉRREZ, P.A.. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials. 2009; 23:872–877

KIM, S.. Application of response surface method as an experimental design to optimize coagulation–flocculation process for pre-treating paper wastewater. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2016; 38:93–102

KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S.K.; NAYAK, S.; DUTTA, S.C.. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. Construction and Building Materials. 2017; 131:721–740

LEDESMA, E.F.; JIMÉNEZ, J.R.; FERNANDEZ, J.M.; GALVIN, A.P.; AGRELA, F.; BARBUDO, A.. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. 2014; 71:289–98.

LOVATO, P. S.; MENEGATTI, R.. Influência da pré-umidificação do agregado reciclado de resíduos da construção civil nas propriedades de argamassas de revestimento. In: XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA 2015). Porto Alegre: SBTA, 2015. 16 p.

MARTÍNEZ, P.S.; CORTINA, M.G.; MARTÍNEZ, F.F; SANCHEZ, A. R.. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. Journal of Cleaner Production. 2016;118: 162-169

MARTÍNEZ, I; ETXEBERRIA, M; PAVÓN, E; DÍAZ, N.. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. Construction and Building Materials. 2013; 49:384–392

MARTÍN-MORALES, M.; ZAMORANO, M.; RUIZ-MOYANO, A.; VALVERDE-ESPINOSA, I. Characterization of RAs construction and demolition waste for

concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08, Construction and Building Materials, v. 25, p. 742–748, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: IBRACON, 2016. 674 p.

MENESES, C. G. R.; MONTE JÚNIOR, I. V.. Manejo de resíduos sólidos em canteiros de obras. In: XII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (XII SIBESA). Natal. ABES, 2014.

MORAIS, T. A.. Estudo do uso do agregado miúdo reciclado de concreto na produção de argamassa de revestimento vertical. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

NENO, C.; BRITO, J. de; VEIGA, R.. Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production. Materials Research. 2014; 17(1):168-177

NEVILLE, A. M.: BROOKS, J. J.. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

NEVILLE, A. M.. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

PARVIZ, S. Strength and durability of RAC containing milled glass as partial replacement for cement. Construction and Building Materials, v. 29, p. 368–377, 2012.

PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R.; MOHAMAD, G.. Análise estatística aplicada a modelagem de misturas experimentais de argamassas para revestimento de blocos de concreto. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2006). Florianópolis. 2006.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; de BRITO, J.. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. 2012; 28(1):722–9.

PEDRO, D.; de BRITO, J.; EVANGELISTA, L.. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. Construction and Building Materials. 2017; 154:294–309

PICCHI, F.A..Sistemas de qualidade: uso em empresas de construção de edifícios. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. 462 p.

PINTO, T. de P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. 1999. p. 42. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PIVOTTO, E.; de ABREU, A. G.. Estudo de areia de rejeito basáltico para produção de argamassas. In: XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA 2015). Porto Alegre: SBTA, 2015. 15 p.

POON, C.; SHUI, L.; LAM, L.. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. Construction and Building Materials. 2004; 18:461–468

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F.. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 3. ed . Campinas, SP: Casa do Espirito Amigo fraternidade Fé e Amor, 2014. 358 p.

SALES, A. T. C.; de SÁ, B. R. C.; SANTOS, D. de G.; Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por pó de mármore. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2014). Maceió: ENTAC, 2014. p. 2472-2481.

SAMIEI, R. R.; DANIOTTI, B.; PELOSATO, R.; DOTELLI, G.. Properties of cement-lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. 2015; 84:84–94

SANTOS, W. J. dos. Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento. Viçosa, 155 p. Tese (Doutorado) ‑ Universidade Federal de Viçosa. 2014.

SERRA, J. H. F.; SANTANA, L.B.; CABRAL, A. E. B. Avaliação da reutilização de agregados reciclados de argamassa na produção de emboço. In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2014). Maceió: ENTAC, 2014. p. 2394-2403.

SILVA, R.; de BRITO, J.; DHIR, R. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waster suitable for concrete production. Construction and Building Materials. 2014; 65:201–217

TRISTÃO, F.A. Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.

SUTHERLAND, L.S.; C. AMADO, C.; SOARES, C.G.. Statistical experimental design techniques to investigate the strength of adhesively bonded T-joints. Composite Structures. 2017; 159:445–454

ZHAO, Z..; REMOND, S.; DAMIDOT, D.; XU, W.. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. Construction and Building Materials. 2015; 81:179 -186