

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS COM AGREGADO
RECICLADO MISTO DE RCD PRODUZIDAS COM O MÉTODO DE
MISTURA DA NBR 16541**

JULIANE SANTOS SOUZA

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL
MARÇO/2020

JULIANE SANTOS SOUZA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS COM AGREGADO
RECICLADO MISTO DE RCD PRODUZIDAS COM O MÉTODO DE
MISTURA DA NBR 16541**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Mônica Batista Leite

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

MARÇO/2020

Ficha catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado -UEFS

Souza, Juliane Santos

S715e Estudo do comportamento de argamassas com agregado reciclado misto de RCD produzidos com o método de mistura da NBR 16541 / Juliane Santos Souza. – 2020.
120f.: il.

Orientadora: Mônica Batista Leite

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

1. Agregado reciclado. 2. Argamassa – Método de mistura. 3. Resíduo de construção e demolição. I. Leite, Mônica Batista, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 624.4.036

Rejane Maria Rosa Ribeiro – Bibliotecária CRB-5/695

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS COM AGREGADO
RECICLADO MISTO DE RCD PRODUZIDAS COM O MÉTODO DE
MISTURA DA NBR 16541**

Juliane Santos Souza

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Feira de Santana, 30 de Março de 2020.

Aprovada por:



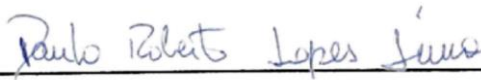
Profª. Drª. Mônica Batista Leite

(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Profª. Drª. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

(Universidade Federal do Pará)



Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

(Universidade Estadual de Feira de Santana)

FEIRA DE SANTANA – BA

MARÇO/2020

Porque Dele, e por Ele, e para Ele são todas
as coisas; glória, pois, a Ele eternamente.
Amém.

Romanos 11:36

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me permitido chegar até aqui e por guiar os meus passos durante esse percurso. Ele foi o meu amparo em todos os momentos de dificuldades e incertezas.

Aos meus pais e meus irmãos, que sempre me incentivaram em todos os momentos. Muito obrigada pelo amor e pelo apoio incondicional. Vocês são tudo para mim.

À professora Mônica minha eterna gratidão, por me ajudar a tornar esse sonho realidade. Muito obrigada pela paciência, atenção e conhecimento passado. É lindo e inspirador ver o seu amor pelo ensino e pela pesquisa.

Aos professores do mestrado, em especial o professor Paulo e a professora Cintia que me acompanharam em algumas disciplinas. Muito obrigada pelo conhecimento transmitido, pelo incentivo e pelos puxões de orelha também, sei que foi com o objetivo de contribuir para a minha formação.

Aos colegas do PPGECEA: Itamara, Lidianne e Patrícia. Também aos que ficaram por menor tempo: Emanuel, Iolanda e Monique. Vocês foram fundamentais para a conclusão dessa etapa. Nunca vou esquecer os momentos de desespero que passamos juntos, que chegavam a ser engraçados, mas, obviamente, também tivemos muitos momentos bons e divertidos, quero levar vocês para a vida.

Também não posso esquecer os amigos da vida que, mesmo indiretamente, foram essenciais durante essa jornada. Não vou citar nomes, mas vocês sabem que tem um lugar especial no meu coração e é muito bom saber que posso contar com vocês.

Aos funcionários da UEFS, especialmente Myrella, Sr. Nilson, Jorge, Mariana e Cátia por toda ajuda, cuidado, prestatividade e socorro nas horas de maior aperto. Também não poderia deixar de citar Isabella, Érica e Talita, sempre dispostas a ajudar e a dar uma palavra de apoio.

A CAPES pelo financiamento da bolsa de estudos e à UEFS.

Enfim, agradeço a todos que, de alguma forma, ajudaram no desenvolvimento desse trabalho. Afinal, ninguém chega a nenhum lugar sozinho.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS COM AGREGADO
RECICLADO MISTO DE RCD PRODUZIDAS COM O MÉTODO DE
MISTURA DA NBR 16541**

Juliane Santos Souza

Março/2020

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Mônica Batista Leite

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

A utilização do agregado reciclado (AR) de resíduo da construção e demolição (RCD) para a produção de argamassas vem sendo estudada nos últimos anos. Entretanto, um aspecto pouco considerado é a sequência de mistura para a produção das argamassas recicladas. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo verificar o comportamento de argamassas com AR de RCD produzidas conforme método de mistura da NBR 16541 (ABNT, 2016). Os teores de AR aplicados em substituição parcial ao agregado natural foram de 15 e 30 %. Para esse trabalho, o ensaio de índice de consistência serviu como parâmetro para avaliação do comportamento das argamassas recicladas quanto ao método de mistura utilizado. No estado fresco foram analisadas ainda as propriedades de retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado. No estado endurecido foi verificada a resistência à compressão e à tração na flexão, absorção por imersão, índice de vazios e massa específica, absorção por capilaridade, permeabilidade e retração por secagem. Os resultados indicam que quanto maior o percentual de AR, mais seco o aspecto das misturas, sendo necessário um maior consumo de água para obter o espalhamento semelhante à mistura de referência. Além disso, foram observadas alterações das propriedades no estado fresco e endurecido, contudo, os resultados apontam que é possível utilizar até 30 % de AR sem que a aplicação dessas argamassas seja inviabilizada, desde que sejam produzidas conforme os procedimentos descritos nesse estudo.

Palavras-chave: Método de mistura. Agregado reciclado. Argamassa. Resíduo da construção e demolição.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

**STUDY OF MORTAR BEHAVIOR WITH RCD MIXED RECYCLED
AGGREGATE PRODUCED WITH THE NBR 16541 MIXTURE METHOD**

Juliane Santos Souza

March/2020

Advisor: Prof^ª. Dr^ª. Mônica Batista Leite

Departament: Civil and Environment Engineering

The use of recycled aggregate (RA) from construction and demolition waste (CDW) for the production of mortars has been studied in recent years. However, the mixing sequence is the least aspect considered for the production of recycled mortars. In this context, the present study aims to verify the behavior of mortars with CDW RA produced according to the method of NBR 16541 (ABNT, 2016). The levels of RA applied in partial replacement to the natural aggregate were 15 and 30 %. For this work, the consistency index test served as a parameter for evaluating the behavior of recycled mortars in terms of the mixing method used. In the fresh state, the properties of water retention, bulk density and incorporated air content were analyzed. In the hardened state, the compressive strength and flexural tensile strength, absorption by immersion, void index, and the specific gravity, absorption by capillarity, permeability and drying shrinkage were verified. The results indicate that the higher the percentage of RA, the drier the appearance of the mixtures, requiring a greater consumption of water to obtain a spread similar to the reference mixture. Besides that, changes in properties were observed in the fresh and hardened state, however, the results indicate that it is possible to use up to 30% of RA without the application of these mortars being impracticable, as long as they are produced according to the procedures described in this study.

Keywords: Mixing method. Recycled aggregate. Mortar. Construction and demolition waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distribuição granulométrica do agregado reciclado e natural do estudo de FERREIRA <i>et al.</i> (2019b)	25
Figura 2 Distribuição granulométrica dos agregados miúdos do trabalho de ANDRADE <i>et al.</i> (2018)	25
Figura 3 Superfície e forma de agregados: a) AR – Resolução de 2 x 0,67 vezes; b) AR – Resolução de 2 x 3,0 vezes; c) AN – Resolução de 2 x 0,67 vezes; d) AN – Resolução de 2 x 3,0 vezes (Fonte: SILVA NETO; LEITE, 2018)	33
Figura 4 Etapas de granulação (Fonte: IVESON <i>et al.</i> , 2013)	34
Figura 5 Estado de aglomeração das partículas em diferentes níveis de saturação: a) Saturação de 18,5 %; b) Saturação de 37 %; c) Saturação de 83,1 %; d) Saturação de 110,9 % (Fonte: MARTIN <i>et al.</i> , 2009)	35
Figura 6 Influência do tempo de mistura no teor de ar incorporado de argamassas convencionais (Fonte: ROMANO <i>et al.</i> , 2009).....	38
Figura 7 Resistência à compressão e porcentagem de vazios conforme o tempo de mistura empregado para a produção de argamassas industrializadas (Fonte: CASALI <i>et al.</i> , 2001).....	38
Figura 8 Influência da sequência de mistura no índice de consistência em função do tempo de espera para a amostra com 15% de teor de água (Fonte: ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005)	39
Figura 9 Representação esquemática da presença de aglomerados de partículas em função da sequência de mistura: a) Sequência P-A; b) Sequência A-P (Fonte: ANTUNES, 2005).....	40
Figura 10 Representação esquemática do método da NBR 7215 (ABNT, 2019)	41
Figura 11 Representação esquemática do método da NBR 16541 (ABNT, 2016)	41
Figura 12 Representação esquemática do método com pré-mistura a seco do estudo de PARK <i>et al.</i> (2006)	42
Figura 13 Representação esquemática do método MDE (Fonte: SILVA NETO; LEITE, 2018).....	42
Figura 14 Representação esquemática do método N30s do estudo de França (2013)	43
Figura 15 Representação esquemática do método F50.50% do estudo de França (2013)	43

Figura 16	Representação esquemática do método F25.75%_120s do estudo de França (2013)	43
Figura 17	Representação esquemática do método F25.75%_180s do estudo de França (2013)	43
Figura 18	Relação entre a demanda de água <i>versus</i> percentual de AR, identificada em dados da literatura.....	45
Figura 19	Resultados de literatura do comportamento das argamassas com AR quanto à densidade de massa.....	49
Figura 20	Resultados da literatura para o comportamento de argamassas quanto ao ensaio de teor de ar incorporado.....	50
Figura 21	Resultados de literatura da resistência à compressão de argamassas recicladas	52
Figura 22	Retração por secagem <i>versus</i> perda de massa do estudo de Lima e Leite (2012)	55
Figura 23	Retração relativa para argamassas estudadas por Silva <i>et al.</i> (2016)	56
Figura 24	Curva granulométrica do CP II F – 32 utilizado nesse estudo	61
Figura 25	Composição gravimétrica do RCD utilizado nessa pesquisa (Fonte: CARNEIRO, 2011)	62
Figura 26	Aspecto visual do AR após peneiramento	62
Figura 27	Curva granulométrica dos finos do AR com dimensão inferior aos 75 µm.....	63
Figura 28	Curvas de distribuição granulométrica do AN, AR e composição de ambos os materiais.....	64
Figura 29	Sequência de mistura da NBR 16541 (ABNT, 2016)	66
Figura 30	Sequência de mistura da NBR 7215 (ABNT, 2019)	67
Figura 31	Representação esquemática do gráfico de retração <i>versus</i> perda de massa	68
Figura 32	Corpos de prova selados com filme plástico para a realização do ensaio de absorção por capilaridade	69
Figura 33	Esquema do gráfico gerado pelo ensaio de absorção por capilaridade, adaptado de KELHAM (1988)	69
Figura 34	Ensaio de permeabilidade pelo método do Cachimbo: a) Instrumento utilizado para a realização do ensaio; b) Cachimbos fixados na superfície da amostra	70
Figura 35	Relação a/c efetiva para as argamassas avaliadas.....	72

Figura 36 Aspecto das argamassas no ensaio de consistência para as misturas sem compensação da relação a/c (SC): a) REF 7215 (ABNT, 2019); b) 15 % 7215 (ABNT, 2019); c) 30 % 7215 (ABNT, 2019); d) REF 16541 (ABNT, 2016); e) 15 % 16541 (ABNT, 2016); f) 30 % 16541 (ABNT, 2016).....	73
Figura 37 Aspecto das argamassas no ensaio de consistência para as misturas com compensação da relação a/c (CC): a) REF 7215 (ABNT,2019); b) 15 % 7215 (ABNT, 2019); c) 30 % 7215 (ABNT, 2019); d) REF 16541 (ABNT, 2016); e) 15 % 16541 (ABNT, 2016); f) 30 % 16541 (ABNT, 2016).....	74
Figura 38 Retenção de água relativa para as argamassas estudadas	76
Figura 39 Resultados médios para o ensaio de retenção de água para as diferentes misturas: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c – CC.....	77
Figura 40 Resultados relativos para os ensaios de: a) densidade de massa; b) teor de ar incorporado.....	78
Figura 41 Comportamento das argamassas quanto à densidade de massa: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c - CC.....	80
Figura 42 Comportamento das argamassas quanto ao teor de ar incorporado: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c - CC.....	80
Figura 43 Resultados relativos para os índices físicos das argamassas recicladas: a) absorção por imersão; b) índice de vazios.....	82
Figura 44 Influência do tipo de mistura na absorção de água por imersão: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c - CC.....	83
Figura 45 Influência do tipo de mistura no índice de vazios das argamassas: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c - CC.....	84
Figura 46 Resistência à compressão relativa para as argamassas avaliadas	85
Figura 47 Influência do teor de AR sobre a resistência à compressão: a) misturas sem correção da relação a/c - 7 dias; b) misturas sem correção da relação a/c - 28 dias; c) misturas com correção da relação a/c - 7 dias; d) misturas com correção da relação a/c - 28 dias.....	87
Figura 48 Resistência à tração na flexão relativa para as argamassas	88
Figura 49 Influência do teor de AR para o ensaio de resistência à tração: a) misturas sem correção da relação a/c 7 dias; misturas sem correção da relação a/c 28 dias; c) misturas com correção da relação a/c 7 dias; misturas com correção da relação a/c 28 dias.....	90

Figura 50	Resultados de capilaridade para as argamassas sem correção da relação a/c	91
Figura 51	Resultados de capilaridade para as argamassas com correção da relação a/c	92
Figura 52	Taxa de absorção por capilaridade relativa para as argamassas	93
Figura 53	Permeabilidade relativa para as argamassas com AR em relação à mistura de referência	94
Figura 54	Influência do AR na taxa média de permeabilidade das argamassas de revestimentos	95
Figura 55	Permeabilidade à água em relação ao tempo para as argamassas estudadas: a) Misturas sem correção da relação a/c; b) Misturas com correção da relação a/c	96
Figura 56	Retração e perda de massa média para as misturas avaliadas nesse estudo.....	97
Figura 57	Retração por secagem <i>versus</i> perda de massa: a) argamassa REF; b) argamassa 15%SC; c) argamassa 30%SC; d) argamassa REF; e) argamassa 15%CC; f) argamassa 30%CC	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Levantamento bibliográfico dos teores de material pulverulento para agregado reciclado.....	28
Tabela 2	Valores de massa específica e massa unitária para agregados reciclados .	29
Tabela 3	Taxa de absorção de água para agregados reciclado e natural.....	31
Tabela 4	Índice de consistência conforme o método de mistura.....	46
Tabela 5	Comparação de resultados de literatura para retenção de água de argamassas com AR e AN.....	47
Tabela 6	Retenção de água para argamassas com agregado reciclado de RCD.....	48
Tabela 7	Teor de ar incorporado das argamassas avaliadas por Silva Neto e Leite (2018)	51
Tabela 8	Densidade de massa das argamassas avaliadas por Silva Neto e Leite (2018)	51
Tabela 9	Resistência mecânica das argamassas recicladas avaliadas por Silva Neto e Leite (2018).....	53
Tabela 10	Avaliação do índice de vazios de argamassas com RCD por meio de dois métodos de mistura.....	57
Tabela 11	Análise da taxa de absorção de água para argamassas produzidas com RCD por meio de dois métodos de mistura	58
Tabela 12	Propriedades físicas e mecânicas do cimento.....	60
Tabela 13	Caracterização do agregado miúdo natural.....	61
Tabela 14	Ensaio realizados para a caracterização do agregado miúdo reciclado...	63
Tabela 15	Características das areias compostas por AN e AR utilizadas nesse estudo.....	65
Tabela 16	Resultados para o ensaio de caracterização dos blocos cerâmicos usados como substrato.....	65
Tabela 17	Consumo de materiais (kg) para a produção de um metro cúbico de argamassa produzida com o método de mistura da NBR 16541 (ABNT, 2016)	66
Tabela 18	Índice de consistência médio para as misturas avaliadas nesse estudo	71
Tabela 19	Resultados médios de retenção de água das misturas estudadas	76
Tabela 20	Resultados da ANOVA para o ensaio de retenção de água.....	76
Tabela 21	Resultados médios de densidade de massa e teor de ar incorporado das misturas estudadas	78

Tabela 22	Resultados da ANOVA para a densidade de massa e teor de ar incorporado.....	79
Tabela 23	Resultados de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real das argamassas estudadas	81
Tabela 24	Resultados da ANOVA para a absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real	83
Tabela 25	Resultados médios do ensaio de resistência à compressão para as argamassas avaliadas	84
Tabela 26	Resultados da ANOVA para o ensaio de resistência à compressão quando avaliado o teor de substituição, a idade e a correção da relação a/c	86
Tabela 27	Resultados de resistência à tração das argamassas estudadas	88
Tabela 28	Resultados da ANOVA para a resistência à tração na flexão quando avaliado o teor de substituição, a idade e a correção da relação a/c	89
Tabela 29	Resultados médios de absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas.....	91
Tabela 30	Resultados da ANOVA para o ensaio de absorção por capilaridade.....	93
Tabela 31	Taxa média de permeabilidade de água por minuto para cada amostra de argamassa de revestimento	94
Tabela 32	Resultados da ANOVA para o ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo.....	95
Tabela 33	Retração por secagem e perda de massa relativas para argamassas estudadas em diferentes idades	99
Tabela 34	Resultados individuais de consistência.....	114
Tabela 35	Resultados individuais de retenção de água	114
Tabela 36	Resultados individuais de densidade de massa e teor de ar incorporado	114
Tabela 37	Resultados individuais de resistência à compressão.....	115
Tabela 38	Resultados individuais de resistência à tração na flexão	115
Tabela 39	Resultados individuais para o ensaio de absorção por imersão.....	116
Tabela 40	Resultados individuais para a taxa de permeabilidade	116
Tabela 41	Resultados individuais para o ensaio de absorção por capilaridade	116
Tabela 42	Resultados médios do ensaio de retração por secagem e perda de massa para as argamassas desse estudo.....	117
Tabela 43	Teste de Tukey para o ensaio de retenção de água.....	118
Tabela 44	Teste de Tukey para o ensaio de densidade de massa	118

Tabela 45	Teste de Tukey para o ensaio de teor de ar incorporado	118
Tabela 46	Teste de Tukey para o ensaio de absorção por imersão.....	118
Tabela 47	Teste de Tukey para o ensaio de índice de vazios	119
Tabela 48	Teste de Tukey para o ensaio de resistência à compressão, aos 7 dias...	119
Tabela 49	Teste de Tukey para o ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias	119
Tabela 50	Teste de Tukey para o ensaio de resistência à tração na flexão, 7 dias..	119
Tabela 51	Teste de Tukey para o ensaio de resistência à tração na flexão, 28 dias.....	120
Tabela 52	Teste de Tukey para o ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo.....	120

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	21
2.1	GERAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	21
2.2	AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	23
2.2.1	Composição granulométrica.....	24
2.2.2	Teor de finos.....	26
2.2.3	Massa específica e massa unitária	28
2.2.4	Absorção de água	30
2.2.5	Forma e textura.....	32
2.3	INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE MISTURA NA OBTENÇÃO DE ARGAMASSAS	33
2.3.1	Fatores que influenciam a mistura das argamassas	35
2.3.2	Tipos de misturas para argamassas	40
2.4	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS RECICLADAS	44
2.4.1	Propriedades no estado fresco	44
2.4.1.1	Consistência	44
2.4.1.2	Retenção de água	46
2.4.1.3	Densidade de massa e teor de ar incorporado	48
2.4.2	Propriedades das argamassas no estado endurecido	51
2.4.2.1	Resistência à tração e à compressão	51
2.4.2.2	Retração por secagem	54
2.4.2.3	Massa específica, porosidade e absorção de água	56
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	59
3.1	VARIÁVEIS DO ESTUDO.....	59
3.2	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	60
3.2.1	Cimento	60
3.2.2	Agregado miúdo natural.....	61
3.2.3	Agregado reciclado	62

3.2.4	Água	65
3.2.5	Substrato de blocos cerâmicos	65
3.3	DEFINIÇÃO DO TRAÇO E PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	65
3.4	PROPRIEDADES AVALIADAS.....	67
3.4.1	Propriedades das argamassas no estado fresco	67
3.4.2	Propriedades no estado endurecido	67
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	PROPRIEDADES AVALIADAS NO ESTADO FRESCO.....	71
4.1.1	Consistência	71
4.1.1.1	Comparativo entre o método da NBR 16541 e o método da NBR 7215	71
4.1.1.2	Avaliação do uso do AR no ensaio de consistência usando o método de mistura da NBR 16541.	74
4.1.2	Retenção de água.....	75
4.1.3	Densidade de massa e teor de ar incorporado	78
4.2	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	81
4.2.1	Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica	81
4.2.2	Resistência à compressão	84
4.2.3	Resistência à tração na flexão	87
4.2.4	Absorção por capilaridade.....	90
4.2.5	Permeabilidade pelo método do cachimbo.....	94
4.2.6	Retração por secagem.....	97
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
5.1	CONCLUSÃO	102
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICE A – RESULTADOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO PARA AS ARGAMASSAS AVALIADAS NESSE ESTUDO....	114
	APÊNDICE B – RESULTADOS DOS TESTES DE TUKEY	118

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é responsável por um volume expressivo de resíduos provenientes da sua cadeia produtiva. Um panorama estabelecido pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) verificou que em 2018 a indústria da construção gerou no país 122.012 toneladas de resíduo por dia (ABRELPE, 2019). Esses materiais são comumente descartados de forma irregular, o que configura um problema para a gestão dos municípios, além de poluir o meio ambiente. Outro fator relacionado é a diminuição da vida útil dos aterros, devido ao alto volume ocupado por esse tipo de resíduo (FARIAS, 2014; GONÇALVES, 2013).

Simultaneamente, o setor de agregados explora jazidas para a extração de areia, que é uma matéria-prima natural muito utilizada na Construção Civil. Segundo a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados (ANEPAC), em 2014, o consumo de areia no Brasil foi cerca de 439 milhões de toneladas (ANEPAC, 2015). Nesse sentido, o beneficiamento do resíduo de construção e demolição (RCD) para aplicá-lo como agregado reciclado (AR) pode ser uma alternativa para a redução dos impactos causados pela má disposição dos RCD, assim como, pela extração dos agregados naturais (AN) (FARIAS, 2014; ULSEN *et al.*, 2013).

Contudo, é importante evidenciar que os AR apresentam características distintas quando comparados aos AN, pois possuem elevado potencial de absorção de água, forma mais angular e irregular, textura áspera e alto percentual de partículas com granulometria fina (FERREIRA *et al.*, 2019b; JESUS *et al.*, 2019; MARTÍNEZ *et al.*, 2016). Essas particularidades fazem com que, quando incorporado na composição de materiais cimentícios, os AR promovam uma modificação das propriedades do material tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido (EVANGELISTA *et al.*, 2015; LEDESMA *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2015).

Assim, alguns estudos foram desenvolvidos com o objetivo de compreender melhor o comportamento de argamassas com AR de RCD (ANDRADE *et al.*, 2018; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2020; JIMÉNEZ *et al.*, 2013; LEDESMA *et al.*, 2015). Os resultados indicam que, de fato, as diferentes características dos materiais reciclados influenciam no desempenho das argamassas e essa interferência é variável a depender da proporção de AR utilizada na mistura, do teor de finos e da origem do AR (cerâmico, cimentício ou

misto) (ALVARENGA, 2018; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2020; FERREIRA *et al.*, 2019b; JOCHEM, 2012).

Conforme indica a literatura, é comum a perda de trabalhabilidade das argamassas com AR de RCD, em função das diferentes propriedades que esses agregados apresentam (ANDRADE *et al.*, 2018; FERREIRA *et al.*, 2017b). A ausência de um método de mistura que leve em consideração a alta taxa de absorção dos AR, por exemplo, pode aumentar a demanda de água para obter a mesma consistência dos traços de referência (LEDESMA *et al.*, 2016; NENO; BRITO; VEIGA, 2014). Para suprir a maior demanda de água dos AR é comum o uso da molhagem prévia das partículas, com o objetivo compensar o seu alto potencial de absorção (MALTA *et al.*, 2014; YACOUB; DJERBI; FECHONG, 2018). Em outros trabalhos foi realizada a correção da relação água/cimento (a/c) efetiva (JIMÉNEZ *et al.*, 2013; NENO; BRITO; VEIGA, 2014). Entretanto, as práticas supracitadas podem influenciar na resistência mecânica e durabilidade desses materiais (MALTA *et al.*, 2014; MARTÍNEZ *et al.*, 2016).

De forma geral, os estudos aplicados às argamassas convencionais indicam que as diferentes sequências de mistura influenciam o seu comportamento, inclusive na trabalhabilidade (ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005; HIREMATH; YARAGAL, 2017; PLAWSKY *et al.*, 2003). Yang e Jennings (1995) verificaram que o acréscimo da água de forma fracionada, pode reduzir a consistência dos sistemas argamassados em comparação aqueles produzidos com toda a água adicionada em apenas uma etapa. Já Antunes (2005) constatou que a adição dos materiais anidros, seguido da fase líquida requer menor energia do equipamento para atingir uma viscosidade adequada. Dentre as variáveis inerentes aos processos de mistura que podem influenciar no desempenho das argamassas é possível citar o tempo de processamento, a velocidade aplicada pelo misturador, a forma de incorporação da água e a sequência de adição dos materiais (FRANÇA, 2013).

Com base no que foi exposto, percebe-se que é importante a avaliação das argamassas não apenas quanto ao tipo de agregado empregado e o percentual de substituição, mas também conforme o método aplicado durante o processo de preparo. Embora existam pesquisas que abordem a influência do método de mistura para as argamassas convencionais (ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005; FRANÇA, 2013; PRASITTISOPIN;

TREJO, 2014), percebe-se que há poucas informações sobre o comportamento dos sistemas argamassados produzidos com materiais reciclados.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe a análise de propriedades de argamassas com AR de RCD levando em consideração a metodologia de produção proposta pela NBR 16541 (ABNT, 2016), um método com adição de água de forma fracionada. Essa norma foi recentemente publicada pela ABNT para a produção de argamassas convencionais, mas ainda é pouco avaliada em argamassas recicladas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é a avaliar as propriedades de argamassas com agregado miúdo reciclado misto de resíduo da construção e demolição produzidas usando o método de mistura prescrito na NBR 16541 (ABNT, 2016).

Os objetivos específicos são:

- avaliar a trabalhabilidade obtida pelas argamassas recicladas produzidas com o método de mistura da NBR 16541 (ABNT, 2016) em comparação às produzidas pelo método da NBR 7215 (ABNT, 2019) por meio do ensaio de consistência;
- verificar o efeito da aplicação de diferentes teores do AR misto no comportamento das argamassas;
- estudar as propriedades das argamassas:
 - no estado fresco, quanto à consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado;
 - no estado endurecido, quanto resistência à compressão, resistência à tração na flexão, retração por secagem, absorção por imersão, massa específica, índice de vazios, absorção por capilaridade e permeabilidade.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esse estudo está organizado em 5 capítulos. No primeiro é apresentada a introdução, que consta a justificativa, a relevância, os objetivos, bem como, a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo foi feita uma revisão bibliográfica, abordando aspectos relacionados aos métodos de mistura aplicados na produção de argamassas. Posteriormente discutiu-se sobre os AR de RCD e, por fim, sobre as propriedades dessas argamassas.

No terceiro capítulo é detalhado o programa experimental adotado para o desenvolvimento do estudo. São apresentados os materiais utilizados, a definição do traço, o percentual de AR aplicado na composição das misturas, o método empregado na produção das argamassas e os ensaios usados na avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco e no estado endurecido.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados e as discussões para os ensaios realizados.

No quinto capítulo estão apresentadas as conclusões e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 ARGAMASSA COM AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.1 GERAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A indústria da construção civil é uma das maiores geradoras de resíduos no mundo. O crescimento da população, em conjunto com o desenvolvimento urbano foram alguns dos maiores responsáveis para que esses índices se elevassem (FARIAS, 2014; MEYER, 2009).

Um diagnóstico realizado por Gonçalves (2013) aponta que os RCD correspondem a um percentual de 59,8 % do total dos resíduos urbanos gerados no Brasil. Se esse material não for reutilizado ou reciclado poderá ocasionar problemas de falta de locais disponíveis para o seu armazenamento, considerando o alto volume que ocupam nos aterros. Vale ressaltar que muitas vezes os RCD são descartados de forma irregular em terrenos baldios e vias públicas, passando a representar um problema de gestão para os municípios.

Os dados da ABRELPE (2017) indicam que as cidades brasileiras geraram no ano de 2017 um total de 45 milhões de toneladas de RCD. Entretanto, esse número pode ser ainda maior, pois só são considerados por essa associação os materiais dispostos em logradouros públicos ou os provenientes de obras municipais. No entanto, Ulsen *et al.* (2013) citam uma quantidade superior, correspondente a uma geração de 70 milhões de toneladas de RCD por ano.

Quanto à composição desse tipo de resíduo, um levantamento realizado por Gonçalves (2013) indica que 45 % dos RCD gerados nas cidades brasileiras são classificados como classe A. Conforme detalhado pelo autor, os RCD são compostos por tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassa e concreto, na sua maioria. A Resolução N° 307 (CONAMA, 2002) do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, alterada pela Resolução N° 448 (CONAMA, 2012), especifica que esse tipo de material pode ser reutilizado ou reciclado como agregados. Desse modo, tais práticas configuram uma boa alternativa para que os RCD não sejam apenas lançados em áreas de descarte.

Meyer (2009) exemplifica o caso do Japão, país no qual a capacidade dos aterros está chegando ao seu limite e a quantidade de agregado natural disponível para uso está se

tornando escassa. Nesse cenário, os AR de RCD podem configurar uma excelente alternativa de uso.

Com o objetivo de melhorar o panorama da gestão dos RCD no Brasil, foram criadas políticas de responsabilidade com o objetivo de reduzir os impactos econômicos e ambientais oriundos da geração e descarte desse resíduo. A Resolução N° 307 (CONAMA, 2002), alterada pela N° 448 (CONAMA, 2012), por exemplo, especifica que é primordial pensar na redução, reutilização, reciclagem, tratamento e destinação final do RCD de forma ambientalmente apropriada. No âmbito da gestão eficiente desse tipo de material, é possível destacar o município de Belo Horizonte, que conforme Farias (2014), foi um dos precursores na gestão dos RCD. De forma geral, essas ações contribuíram para a criação de novas usinas de reciclagem no Brasil.

Conforme os dados da ABRECON (2015), há uma estimativa da existência de cerca de 310 usinas de beneficiamento de RCD em todo o país e apenas 21 % do resíduo gerado vem sendo reciclado. Considerando esses dados, verifica-se que ainda é necessário um avanço quanto às políticas de incentivo à gestão adequada desse tipo de material, visto que, as pesquisas desenvolvidas nos últimos anos demonstram o bom potencial que os RCD apresentam para serem reinseridos no ciclo da construção civil. Ulsen *et al.* (2013), por exemplo, citam que o uso do agregado reciclado pode diminuir o consumo de matérias-primas naturais, principalmente nos grandes centros urbanos, onde é normal existir altos custos com transportes devido a grande distância entre o local de fornecimento e utilização.

Quanto à composição do RCD que é gerado, de acordo com Miranda, Ângulo e Careli (2009), existem ainda poucos dados, mas na literatura esse material é descrito como bem heterogêneo, sendo a sua composição resultante das características das construções que deram origem ao resíduo. Alguns pesquisadores citam que os principais componentes dos RCD provenientes das atividades relativas à construção civil são argamassa, material cerâmico e concreto, sendo este último o material encontrado em menores taxas (GONÇALVES, 2014; SÁEZ *et al.*, 2018). As condições supracitadas fazem com que o AR apresente uma maior variação nas suas características, tais como massa específica e absorção (CONTRERAS *et al.*, 2016; SILVA; BRITO; DHIR, 2014).

Como foi possível perceber, os RCD são gerados no Brasil a uma quantidade expressiva e possuem grande potencial de utilização, já que um percentual relevante é de resíduo classe A. Outro preceito que também deve ser considerado é que esse tipo de material deixa de ser encaminhado para os aterros e retorna ao ciclo da construção civil, diminuindo os seus impactos. Com base nisso, verifica-se que é importante que se desenvolvam mais estudos nessa área.

2.2 AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os AR possuem características distintas dos AN, o que pode promover alterações nas propriedades das argamassas. O alto potencial de absorção e a maior angulosidade do grão são características importantes que podem diferenciar muito os materiais reciclados dos ditos convencionais (EVANGELISTA *et al.*, 2015; MARTÍNEZ *et al.*, 2016).

Também é importante citar que o AR proveniente do beneficiamento do RCD pode ser bastante heterogêneo. A presença de diferentes materiais, a composição gravimétrica variada e também o tipo de equipamento aplicado durante a etapa de processamento dos resíduos podem causar diferentes efeitos na forma e textura dos grãos, na massa específica, no teor de material pulverulento gerado, entre outros aspectos (JOCHEM, 2012; MALTA *et al.*, 2014; SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

A literatura indica que os agregados provenientes do RCD podem ser encontrados em três composições principais: puramente cimentícios (argamassa e concreto), os cerâmicos e os resíduos mistos (cimentícios e cerâmicos) (CARASEK *et al.*, 2018; ULSEN *et al.*, 2013). Por esse motivo, os AR devem ser caracterizados antes da sua utilização, pois cada tipo de material pode produzir diferentes resultados para as propriedades das argamassas, visto a variação nas suas propriedades físicas tais como: porosidade, granulometria, forma e textura (FERREIRA *et al.*, 2019b; NENO; BRITO; VEIGA, 2014).

Vale salientar que quanto maior o teor de AR utilizado para a produção de argamassas, maior também será a variabilidade nas suas propriedades (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014). Por exemplo, devido ao alto poder de absorção desse tipo de material, quanto maior o percentual de substituição de agregado natural por AR na mistura, mais consistentes tendem a ser as argamassas no estado fresco e, no estado endurecido, de forma geral, apresentam um maior potencial de absorção.

Desse modo, é de suma importância o estudo das propriedades físicas dos AR, assim como, os possíveis efeitos que a sua aplicação pode proporcionar às argamassas. Para tal, deve-se caracterizá-los quanto à distribuição granulométrica, teor de finos, massa específica, absorção de água, forma e textura, pelo menos. É a partir da avaliação desses parâmetros que é possível o uso desses materiais de forma adequada.

2.2.1 Composição granulométrica

A curva granulométrica das areias recicladas é resultado do processo de britagem dos RCD. É consenso na literatura que os AR tendem a apresentar uma composição granulométrica mais bem distribuída, o que é favorável à dosagem das argamassas, pois pode promover um maior preenchimento dos vazios (BRAGA; BRITO; VEIGA, 2012; SILVA; BRITO; DHIR, 2014).

Carasek *et al.* (2018) realizaram um estudo com diferentes tipos de agregados, dentre os quais o misto de RCD e o agregado exclusivamente derivado de materiais cimentícios. Os autores verificaram que ao efetuar o beneficiamento de forma semelhante para ambos os materiais é possível obter granulometrias muito similares, apesar da diferença na composição desses materiais.

Na literatura existem alguns exemplos de curvas granulométricas obtidas a partir do beneficiamento de RCD. Ferreira *et al.* (2019b), por exemplo, avaliaram algumas variações na dimensão do AR miúdo misto para a produção de argamassas. A Figura 1 mostra que a adição de AR melhorou a distribuição granulométrica das misturas de agregados, pois, os AR apresentaram uma distribuição mais contínua que os AN.

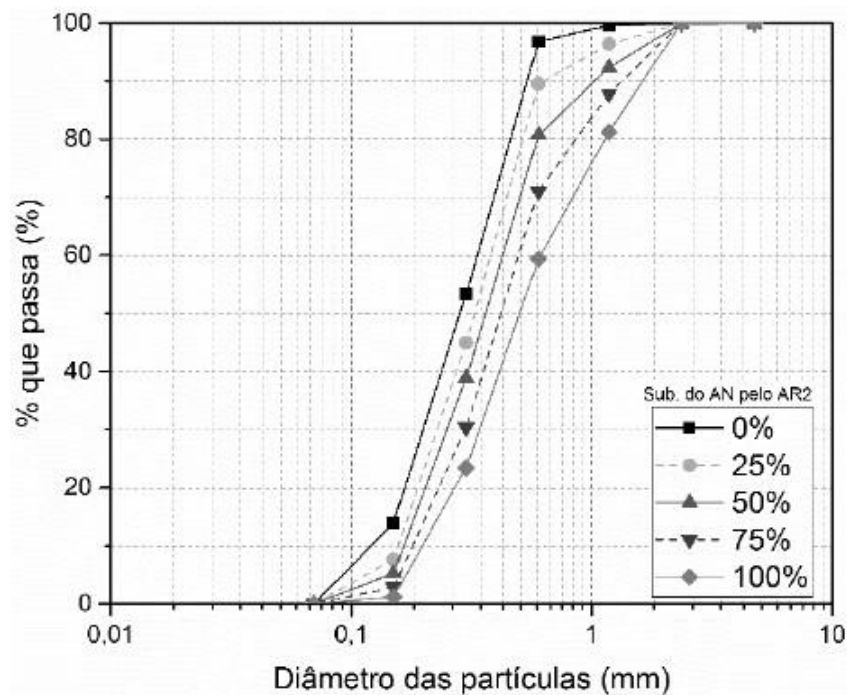


Figura 1 Distribuição granulométrica do agregado reciclado e natural do estudo de FERREIRA *et al.* (2019b)

Andrade *et al.* (2018) também estudaram a aplicação de dois tipos de AR (misto e cerâmico) em argamassas. Os resultados indicam que os materiais reciclados possuam curvas granulométricas melhor distribuídas e mais contínuas que a areia natural (Figura 2).

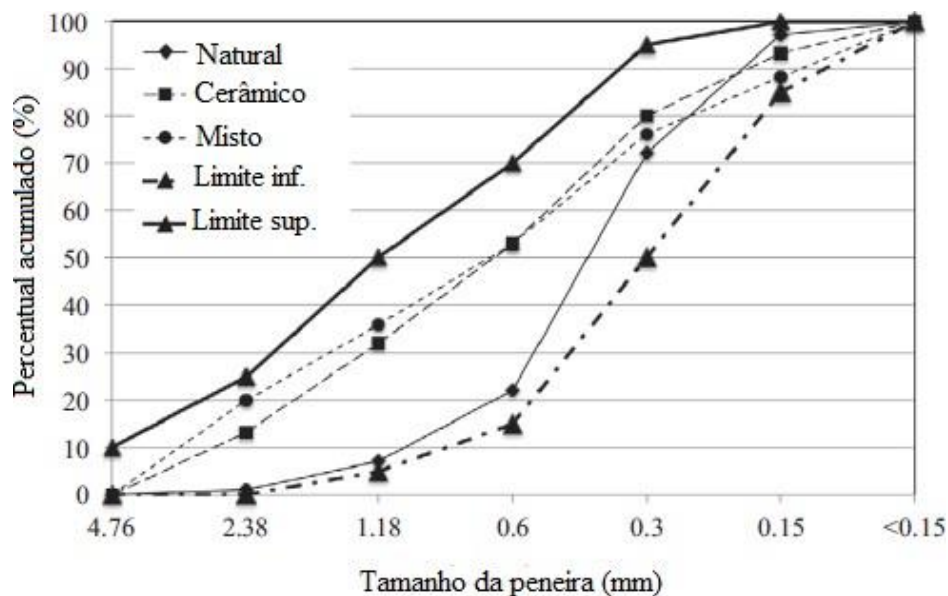


Figura 2 Distribuição granulométrica dos agregados miúdos do trabalho de ANDRADE *et al.* (2018)

Ao analisar as curvas granulométricas dos AR, mostradas na Figura 1 e na Figura 2, compreende-se que esses materiais tendem a promover um melhor empacotamento dos

sistemas. Condição semelhante foi observada por Carneiro (2011), Malta *et al.* (2014) e Monte Júnior (2017).

A quantidade de vazios na mistura é um importante parâmetro para o bom desempenho das argamassas. Essa variável está associada à distribuição do tamanho das partículas. Assim, quanto melhor distribuída for a granulometria, maior será o empacotamento dos grãos e, conseqüentemente, menor a quantidade de vazios para serem preenchidos pela pasta de cimento (FERRO *et al.* 2015; KATZ; KULISCH, 2017). Caso contrário, será necessária uma maior quantidade de matriz cimentícia para lubrificar os grãos, o que tende a tornar as misturas mais caras e mais propensas ao processo de retração (CORINALDESI, 2009).

Oliveira (2012) observou durante a sua revisão bibliográfica que os AR são utilizados nos trabalhos com argamassa com uma dimensão máxima característica de 2,4 mm. Foi dado como justificativa o fato de que maiores valores poderiam ocasionar um acabamento mais rugoso para o revestimento, dada a maior angulosidade para os grãos provenientes de materiais reciclados de RCD.

A composição granulométrica dos agregados também interfere diretamente nas propriedades das argamassas. No estado fresco, por exemplo, os grãos que possuem granulometria mais contínua são mais suscetíveis a apresentar uma maior trabalhabilidade, pois facilita o deslizamento entre as partículas. No estado endurecido viabiliza melhores resistências mecânicas e uma possível redução da porosidade, uma vez que a estrutura interna apresentará uma menor quantidade de vazios (ANDRADE *et al.*, 2018; JIMÉNEZ *et al.*, 2013).

Conforme o que foi observado na revisão de literatura, de forma geral, os AR apresentam uma melhor distribuição granulométrica quando comparados aos AN. Essa condição pode ser benéfica ao desempenho das argamassas, uma que vez pode melhorar suas propriedades nos estados fresco e endurecido.

2.2.2 Teor de finos

Os materiais finos podem ser definidos como a fração miúda passante na peneira de 75 µm. Os AR de RCD, de forma geral, apresentam um alto percentual desses materiais em

sua composição quando comparados aos AN (EVANGELISTA, *et al.*, 2015; FERREIRA *et al.*, 2019b; JESUS *et al.*, 2019).

A presença de finos é capaz de promover uma melhoria na trabalhabilidade das argamassas, pois pode proporcionar às misturas uma maior compacidade (NENO; BRITO; VEIGA, 2014). No entanto, uma grande concentração desse material tende a causar retração das argamassas, assim como, aumentar a consistência em função da maior superfície específica das partículas e, conseqüentemente, maior demanda de água (FERREIRA *et al.*, 2019b; JIMENEZ *et al.*, 2013; JOCHEM, 2012). Ulsen *et al.* (2013) citam que os grãos mais finos também podem prejudicar a aderência entre pasta e agregado, visto que podem se depositar na superfície dos agregados de maior dimensão, interferindo na resistência mecânica.

Quanto ao material pulverulento que é classificado como a fração passante na peneira com abertura de 0,075 mm, Carasek *et al.* (2018) constataram que as amostras de AR são mais propensas a apresentar uma maior concentração desse material, cerca de 3 a 4 vezes superior quando comparado ao AN. A maior incidência de material pulverulento foi associada às partículas de argamassa que se desprendem do RCD de concreto quando submetido ao processo de britagem, assim como, uma maior fragilidade do grão que tende a se quebrar mais facilmente quando passa pelo processo de beneficiamento (EVANGELISTA *et al.*, 2015).

A Tabela 1 apresenta diferentes tipos de AR com os teores de material pulverulento identificados durante a revisão bibliográfica. A análise dos resultados indica que os AN apresentam menor teor de material pulverulento, conforme é indicado na literatura. Também é perceptível que agregados cerâmicos, de forma geral, tiveram uma maior incidência de material passante na peneira de 0,075 mm, o que é coerente, pois esse tipo de material é mais frágil ao processo de moagem durante o beneficiamento.

Tabela 1 Levantamento bibliográfico dos teores de material pulverulento para agregado reciclado

Referência	Teor de material pulverulento (%)	Tipo de agregado
Carasek <i>et al.</i> (2018)	1,62	Natural
	4,10	Natural
	6,58	Misto
	13,96	Misto
	17,60	Cimentício
Carneiro (2011)	8,60	Misto
Jiménez <i>et al.</i> (2013)	3,20	Natural
	9,00	Cerâmico
Ledesma <i>et al.</i> (2014)	3,20	Natural
	6,10	Concreto
Malta <i>et al.</i> (2014)	4,38	Natural
	6,09	Misto
Martínez <i>et al.</i> (2013)	3,00	Natural
	13,00	Cerâmico
	12,00	Cerâmico e argamassa
	8,00	Concreto

Ainda segundo Carasek *et al.* (2018), o tamanho dos grãos finos é menor para os materiais reciclados, chegando a apresentar uma granulometria menor que 10 μm , ao mesmo tempo em que, os materiais naturais possuem partículas maiores que 60 μm . Portanto, as frações finas recicladas possuem maior superfície específica, e dessa forma, misturas com alto teor desses materiais requerem uma maior quantidade de água de amassamento para manter a trabalhabilidade em níveis adequados (BRAGA; BRITO; VEIGA, 2012; GIRARDI, 2016; OLIVEIRA, 2012).

2.2.3 Massa específica e massa unitária

A massa específica e a massa unitária dos AR de RCD é comumente inferior à dos agregados naturais. A maior porosidade contribui para que os AR sejam menos densos e, dessa forma, ocorra uma redução dessa propriedade física nos materiais reciclados (ANDRADE *et al.*, 2018; SILVA; BRITO; DHIR, 2014). Dados obtidos a partir do estudo de Evangelista *et al.* (2015) indicam uma redução da ordem de 10 a 15 % da massa específica dos AR em relação aos AN.

Oliveira (2012) realizou um levantamento bibliográfico com o intuito de verificar os valores de massa específica identificados por outros autores. Foram constatados valores que variam entre 2,14 kg/dm^3 a 2,65 kg/dm^3 . Estes dados distintos são decorrentes da

composição do resíduo que, conforme já foi mencionado, pode ser bem heterogênea. A Tabela 2 mostra alguns tipos de agregados miúdos encontrados na literatura que foram caracterizados conforme a sua massa específica e massa unitária e também mostra essa variação nos valores para as propriedades avaliadas.

Tabela 2 Valores de massa específica e massa unitária para agregados reciclados

Referência	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Tipo de agregado
Andrade <i>et al.</i> (2018)	2,39	1,25	Cerâmico
	2,40	1,17	Misto
	2,65	1,50	Natural
Carasek <i>et al.</i> (2018)	2,68	1,21	Misto
	2,69	1,46	Misto
	2,54	1,28	Cimentício
Carneiro (2011)	2,44	1,33	Misto
Ferreira <i>et al.</i> (2019b)	2,53	1,30	Misto
	2,64	1,50	Natural
Ledesma <i>et al.</i> (2014)	2,53	1,33	Concreto
Martínez <i>et al.</i> (2013)	2,23	1,28	Misto
	1,90	1,15	Misto
	1,94	1,31	Misto
Martínez <i>et al.</i> (2016)	2,13	1,27	Cerâmico
	2,10	1,33	Concreto
	2,13	1,25	Misto
	2,45	1,56	Natural

As variações identificadas na literatura geralmente são decorrentes da composição gravimétrica do RCD, e a literatura indica que quanto maior o teor de material cerâmico, menor também são os valores encontrados para massa específica e massa unitária (GIRARDI, 2016; NENO; BRITO; VEIGA, 2014; SILVA; BRITO; DHIR, 2014).

Também é perceptível que os valores de massa unitária são os que apresentam maiores variações. Carasek *et al.* (2018) explica que a massa unitária é uma variável dependente da curva granulométrica e da angulosidade que as partículas apresentam. Assim, a configuração dos grãos pode ocasionar uma estrutura com maior quantidade de vazios, e assim, promover alterações nessa propriedade para os diferentes tipos de materiais.

Os resultados obtidos pelos diferentes autores também indicam que, de forma geral, os agregados provenientes do beneficiamento do concreto são os que possuem maior massa específica (Tabela 2). Todavia, é importante destacar que, ainda assim, dentro desse grupo

é possível que ocorra grandes variações, pois os concretos e argamassas podem ser produzidos com diferentes relações a/c e para diferentes finalidades, com isso a sua porosidade também pode ser modificada.

Conforme observado, os AR de RCD podem apresentar uma variabilidade para a massa específica e massa unitária, pois esses dados são resultantes das características dos materiais que os compõem. No que tange ao agregado misto, ou seja, que possui em sua composição argamassa, concreto e material cerâmico, os valores podem ser ainda mais variáveis, pois vai depender do percentual de cada componente no resíduo de origem.

2.2.4 Absorção de água

Os AR possuem elevada porosidade, por isso apresentam um maior potencial de absorção quando comparados aos AN. A alta porosidade do RCD está relacionada às frações de concreto, argamassa e, principalmente, resíduo cerâmico presentes em sua composição (JIMENEZ *et al.*, 2013; LE *et al.*, 2017; LI, *et al.*, 2019).

O potencial de absorção é uma das características que mais causam influência no emprego dos RCD para a produção de materiais cimentícios. Os AR promovem uma diminuição da água efetiva da mistura, o que leva a uma perda de trabalhabilidade (MARTÍNEZ *et al.*, 2016; LI, *et al.*, 2019; YACOUB; DJERBI; FEN-CHONG, 2018).

Na literatura foram encontrados diferentes percentuais de absorção para os AR, conforme descritos na Tabela 3. Cada tipo de material reciclado apresenta um potencial de absorção diferente. As amostras que contém altas frações de cerâmica, por exemplo, são as que apresentam maiores predisposições a absorver mais água. Já os concretos tendem a ser materiais mais densos e, dessa forma, apresentam um índice de absorção menor dentre os materiais reciclados (LEDESMA *et al.*, 2015). Entretanto, Carasek *et al.* (2018) verificaram valores maiores para essa propriedade em agregados reciclados cimentícios, conforme descrito na Tabela 3. Os autores explicaram que esses resultados são decorrentes das características do material utilizado na pesquisa, que foi proveniente de concreteiras, mais especificamente das sobras de concreto dos caminhões betoneira e dos resíduos resultantes de sua lavagem. Devido a essas características, os grãos apresentavam elevada porosidade e taxa de absorção.

Tabela 3 Taxa de absorção de água para agregados reciclado e natural

Referência	Absorção (%)	Tipo de agregado
Andrade <i>et al.</i> (2018)	0,85	Natural
	7,45	Cerâmico
	5,23	Misto
Carasek <i>et al.</i> (2018)	0,85	Natural
	6,11	Misto
	12,01	Misto
	16,58	Cimentício
Carneiro (2011)	0,76	Natural
	13,32	Misto
Ferreira <i>et al.</i> (2019b)	1,34	Natural
	5,37	Misto
Ledesma <i>et al.</i> (2014)	0,79	Natural
	8,26	Concreto
Ledesma <i>et al.</i> (2015)	0,79	Natural
	9,00	Cerâmico
Martínez <i>et al.</i> (2016)	0,92	Natural
	7,48	Cerâmico
	6,88	Misto
	6,12	Concreto
Zhao <i>et al.</i> (2015)	1,05	Natural
	7,54	Concreto

O aumento no teor de utilização do AR promove também o aumento na quantidade de água de amassamento necessária à produção de argamassas, em função da diminuição da relação a/c efetiva da mistura devido a porosidade inerente ao resíduo. Os resultados obtidos por Andrade *et al.* (2018), Ledesma *et al.* (2014) e Restuccia *et al.* (2016) corroboram essa afirmação. Os autores constataram que conforme adicionava-se maiores proporções de AR na mistura, era necessária uma maior relação a/c para obter o espalhamento desejado.

Segundo Le *et al.* (2017), a quantidade de água absorvida pelo AR é minimizada em função da saturação das partículas. Em vista disso, a pré-molhagem é uma técnica que pode ser empregada com o intuito de reduzir o efeito da alta absorção dos AR. Malta *et al.* (2014), por exemplo, propuseram em seu estudo a utilização da técnica de pré-saturação dos AR com teor referente a 10 minutos de absorção. Os autores verificaram que este método foi suficiente para aumentar o teor de água livre na mistura. Dessa forma,

esse procedimento pode ser empregado para que não ocorra uma perda acentuada do espalhamento das argamassas com a utilização do RCD.

2.2.5 Forma e textura

A forma e a textura das partículas de AR são características resultantes do processamento que o resíduo passa durante a fase de beneficiamento. O tipo de britador empregado e também a quantidade de etapas de processamento tem grande relevância para essa propriedade. Segundo Ferreira, *et al.* (2019b), os RCD geralmente passam por dois processamentos de britagem.

Os grãos de AR, de forma geral, apresentam um formato mais angular e irregular que os agregados naturais, como é possível observar na Figura 3 (SILVA NETO; LEITE, 2018). Além disso, é comum as partículas de AR possuírem uma configuração mais lamelar (PAVÓN; MARTÍNEZ; ETXEBERRIA, 2014). Essa condição tende a proporcionar aos agregados de RCD uma maior área superficial e também um maior travamento entre a partícula de agregado e a pasta.

Quanto à textura superficial, é consenso na literatura que os materiais reciclados de RCD possuem faces enrugadas e porosas (CARASEK *et al.*, 2018; SILVA NETO; LEITE, 2018). Como a aderência entre agregado miúdo e pasta acontece por meio do contato superficial, fatores como maior aspereza dos grãos podem ser positivos para a resistência mecânica das argamassas (FERREIRA *et al.*, 2019b).

A produção de argamassas com AR de RCD demanda uma maior quantidade de pasta para promover o deslizamento adequado dos grãos, visto que há uma maior aderência devido a configuração mais irregular e menos arredondada das partículas, que promove um maior atrito interno (CARASEK *et al.*, 2018; LEITE; FIGUEIRÊDO FILHO; LIMA, 2013). Além disso, as misturas produzidas com esse tipo de material tendem a ser mais consistentes e, por isso, demandam uma maior quantidade de água de amassamento para um mesmo traço em que se utiliza um AN (GIRARDI, 2016; OLIVEIRA, 2012; SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

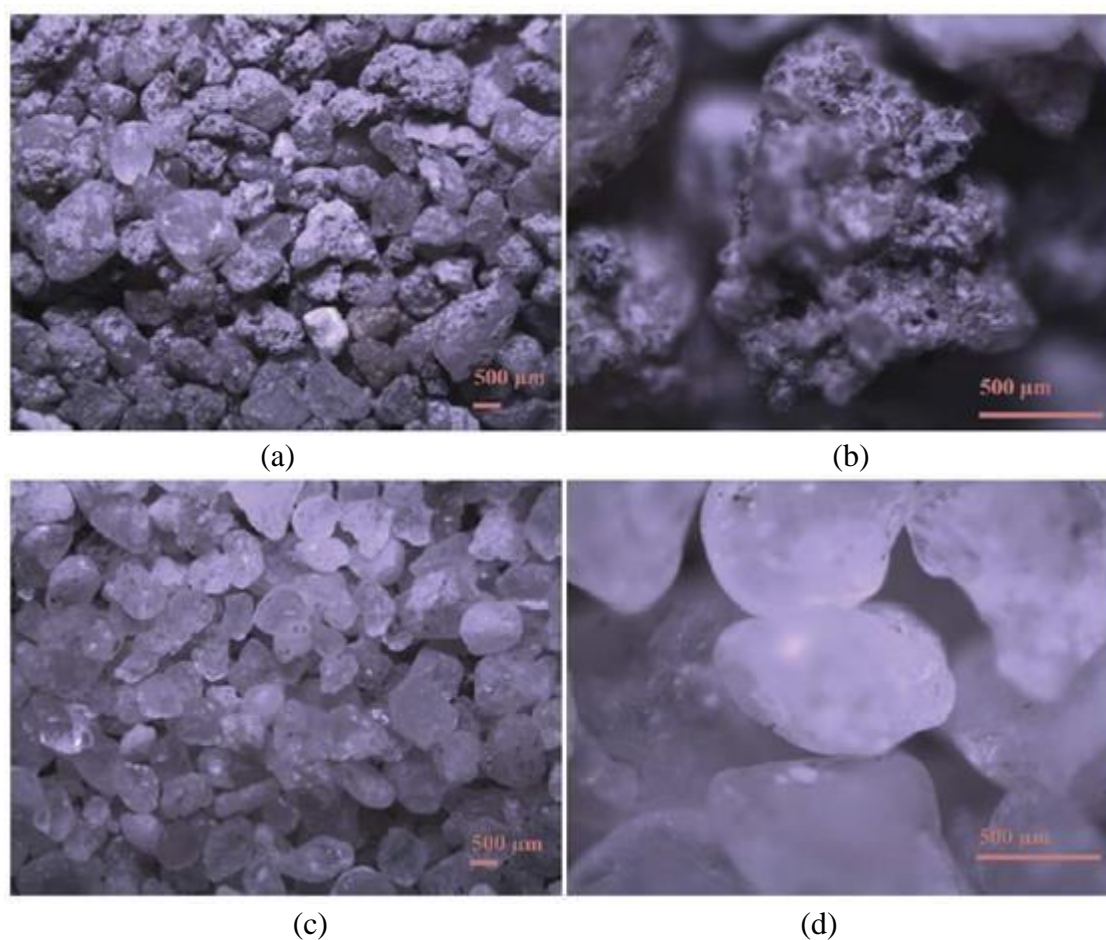


Figura 3 Superfície e forma de agregados: a) AR – Resolução de 2 x 0,67 vezes; b) AR – Resolução de 2 x 3,0 vezes; c) AN – Resolução de 2 x 0,67 vezes; d) AN – Resolução de 2 x 3,0 vezes (Fonte: SILVA NETO; LEITE, 2018)

Apesar das misturas de argamassas com material reciclado apresentarem um maior atrito interno, condição prejudicial às propriedades no estado fresco, percebe-se que no estado endurecido essa característica pode proporcionar uma melhoria da resistência mecânica.

2.3 INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE MISTURA NA OBTENÇÃO DE ARGAMASSAS

O preparo de argamassas é um procedimento multifásico que envolve a mistura dos componentes anidros com a água. Porém, durante o processo há uma pré-disposição da mistura à floculação das partículas mais finas devido às forças de Van der Waals. A etapa de mistura tem justamente como uma das funções a correta homogeneização desses materiais e, concomitantemente, a promoção da quebra das aglomerações (FERRON *et al.*, 2013; FRANÇA, 2013; TAKAHASHI; BIER; WESTPHAL, 2011).

A metodologia de mistura interfere diretamente na reologia das argamassas e, consequentemente, nas propriedades da argamassa no estado fresco e no estado

endurecido, pois a hidratação dos aglomerantes influencia na microestrutura dos materiais cimentícios. Os grãos que permanecem unidos durante a etapa de mistura não serão hidratados adequadamente e podem tornar as argamassas mais heterogêneas (CARDOSO, 2009; DILS; SCHUTTER; BOEL, 2012; HIREMATH; YARAGAL, 2017; PLAWSKY *et al.*, 2003; YANG; JENNINGS, 1995).

Pileggi (2001) e Iveson *et al.* (2001) descreveram em suas pesquisas como o processo de aglomeração em função da umidade ocorre para os materiais cimentícios. Conforme os autores e evidenciado na Figura 4, a baixos níveis de umidade os grãos se aglomeram até atingir o chamado tamanho médio crítico (molhagem e nucleação). Ao se introduzir maiores quantidades de líquido, os vazios existentes entre as partículas vão sendo preenchidos (consolidação e crescimento). Esse processo prossegue até cobrir todos os grãos e atingir a saturação (atrito e quebra). São criadas pontes entre os aglomerados e chega-se ao estágio de dispersão, no qual os aglomerados são desmontados e diminui-se a resistência ao cisalhamento. A partir desse ponto, a mistura passa a ser gradativamente dispersa até tornar-se homogênea.

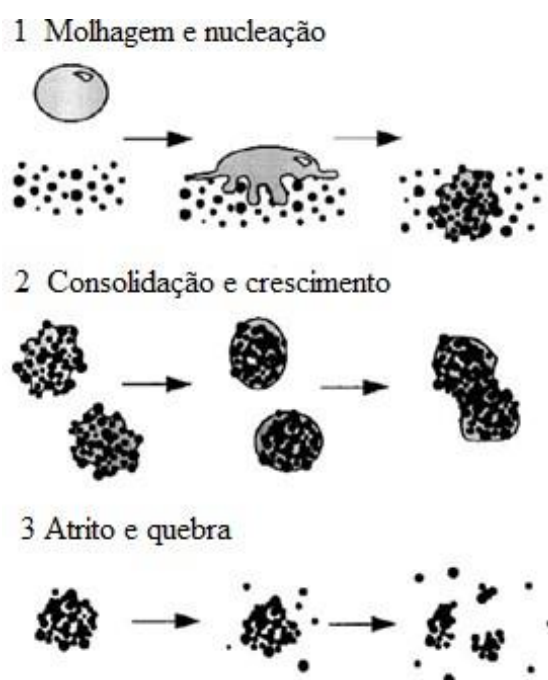


Figura 4 Etapas de granulação (Fonte: IVESON *et al.*, 2013)

Segundo França (2013), a quebra gradual dos grânulos proporciona maior fluidez à mistura e o cisalhamento gerado pelo equipamento tem grande importância nessa etapa, pois é um dos principais responsáveis pela desfloculação dos aglomerados. De acordo

com Martin *et al.* (2009), esse processo varia conforme o nível de saturação do sistema, como exemplificado na Figura 5.

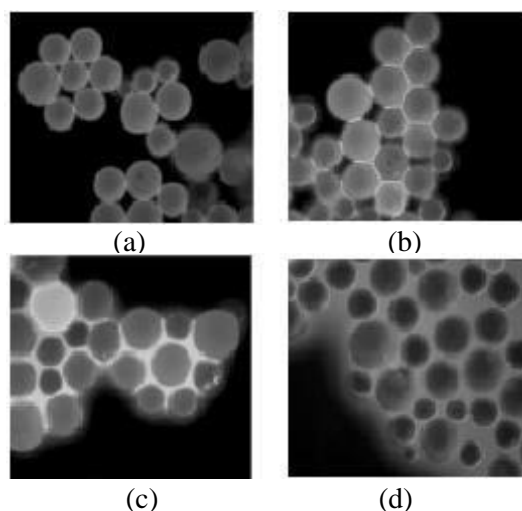


Figura 5 Estado de aglomeração das partículas em diferentes níveis de saturação: a) Saturação de 18,5 %; b) Saturação de 37 %; c) Saturação de 83,1 %; d) Saturação de 110,9 % (Fonte: MARTIN *et al.*, 2009)

É possível observar na Figura 5 que quanto maior o grau de saturação das partículas mais afastados estão os grãos, e estes se encontram devidamente dispersos quando a parte sólida encontra-se em um nível de total saturação, ou seja, todos os poros estão preenchidos pelo fluido, como exemplificado na Figura 5d.

A descrição do processo de granulação e dispersão dos grãos é importante para o entendimento do comportamento das argamassas em face ao processo de mistura. É possível perceber que a atuação do misturador é relevante, assim como, a forma como a água é adicionada ao sistema, mas também existem outros parâmetros que necessitam ser discutidos. Esses itens serão apresentados de forma mais detalhada na Seção 2.3.1.

2.3.1 Fatores que influenciam a mistura das argamassas

As variáveis de controle que devem ser observadas durante os processos de mistura são: equipamento utilizado, taxa de adição de água, velocidade aplicada, tempo e sequência de mistura. O controle desses itens por meio dos diferentes métodos de mistura favorece a obtenção de melhores propriedades para os materiais cimentícios, tanto no estado fresco quanto endurecido (CARDOSO, 2009; HAN; FERRON, 2015; HIREMATH; YARAGAL, 2017).

O equipamento de mistura é o elemento responsável pela aplicação da taxa de cisalhamento, portanto, é um responsável direto pelo processo de homogeneização dos materiais cimentícios. Quando os materiais apresentam alto potencial de coesão, ou ainda, se possuem elevada superfície específica, tendem a se aglomerar, necessitando de uma maior energia do equipamento, para conseguir promover a homogeneidade do sistema (FRANÇA, 2013). No mercado existem diversos tipos de equipamentos. Fernandes *et al.* (2005) chamam a atenção que cada misturador possui uma energia de mistura, assim sendo, pode produzir diferentes efeitos na fluidez e dispersão dos materiais aglomerados. Romano *et al.* (2009) avaliaram o uso de dois tipos diferentes de misturadores para a produção de argamassas, uma betoneira e uma argamassadeira de eixo horizontal. Segundo os autores, houve variação no teor de ar incorporado com a alteração no tipo de equipamento.

Quanto à incorporação de água, alguns autores averiguaram que a adição de forma fracionada tem tendência a produzir misturas mais fluídas e menos consistentes. A adição de água em apenas uma etapa é indicada na literatura como um processo menos eficaz, uma vez que se exige do misturador maior agitação para a dispersão dos aglomerados de forma eficiente (ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005; CARDOSO, 2009; HIREMATH; YARAGAL, 2017; YANG; JENNINGS, 1995).

Vale salientar que quando se trata de um material muito fino, o uso de água em etapas se torna mais adequado para a produção de amostras menos viscosas. Com um processo de mistura apropriado, ainda que o material tenha alto módulo de finura, há uma tendência à diminuição da quantidade de água necessária para a obtenção do índice de consistência (PILEGGI, 2001).

No estudo de França (2013) foram avaliadas cinco sequências de mistura para a produção de argamassas: NBR 13276 (ABNT, 2005), N 30s, que adiciona água em apenas uma etapa e mistura por um tempo total de um minuto, F 50.50%, que a água é adicionada em duas etapas de 50 % e mistura por um tempo total de 120s, F 25.75%_120s e F 25.75%_180s, para esses dois últimos métodos a adição de água foi em duas etapas de 25 % e 75 % e com um tempo de mistura de 120s e 180s, respectivamente. Como resultado foi concluído que os sistemas que prescreviam a adição da água em etapas na argamassa anidra (F 50.50% e F 25.75%) foram os mais fluidos, contudo também foi especificado

que o maior tempo de mistura pode ter contribuído para o melhor desempenho dessas amostras.

Com base nos estudos apresentados, percebe-se que a desaglutinação dos grãos aglomerados é um fator relevante para a boa fluidez das argamassas. Dessa maneira, a utilização de sequências que promovam essa condição pode ter grande importância, principalmente para as argamassas recicladas que, de forma geral, apresentam um maior teor de finos, e poderão ser produzidas com menores relações a/c efetivas.

A velocidade de mistura é outra variável importante, pois conforme Cardoso (2009) está diretamente relacionada ao cisalhamento aplicado à mistura. Baixas velocidades, de forma geral, não promovem a desaglomeração dos materiais de forma eficiente, demandando uma maior quantidade de água de mistura para que a argamassa seja mais homogênea e fluida. Essa configuração pode resultar em um produto mais heterogêneo e com alterações das propriedades. De forma contrária, maiores velocidades interferem positivamente nas características do sistema argamassado, sendo capaz de aumentar a fluidez e diminuir a viscosidade.

Outra variável importante é o tempo de mistura, que pode influenciar no desempenho das argamassas de forma semelhante à velocidade aplicada, haja vista que quanto maior o tempo de mistura, maior também será a tendência das argamassas serem mais homogêneas e menos consistentes (FRANÇA, 2013; HAN; FERRON, 2015).

Na Figura 6 por exemplo, há um indicativo de que quanto maior o tempo de mistura utilizado para o processamento das argamassas, maior também tende a ser a quantidade de ar incorporado ao sistema, ou seja, o tempo de mistura pode influenciar diretamente no teor de ar incorporado. Dessa forma, é importante evitar tempos excessivos de mistura, pois no estado endurecido um alto teor de ar incorporado pode reduzir a resistência mecânica.

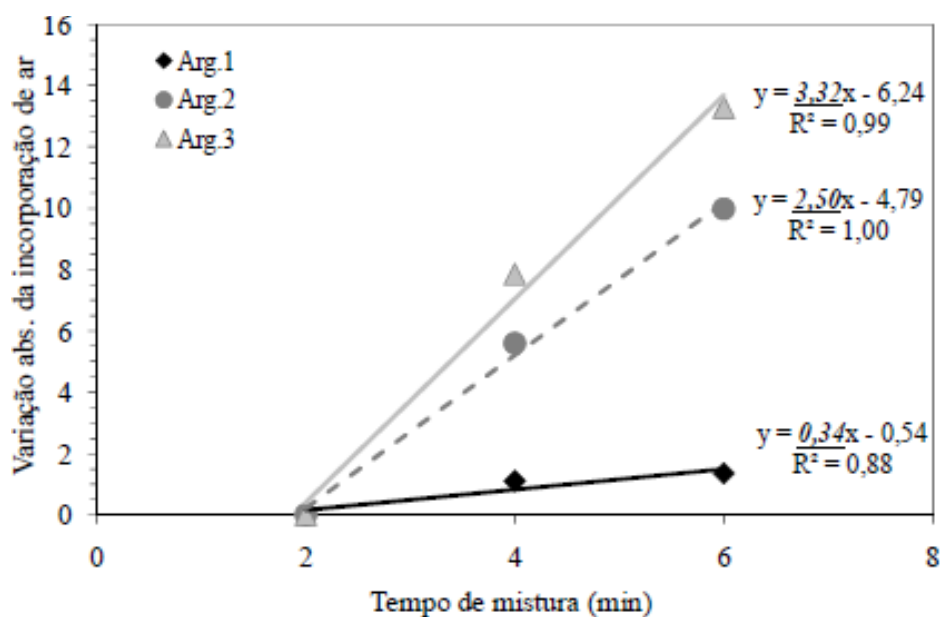


Figura 6 Influência do tempo de mistura no teor de ar incorporado de argamassas convencionais (Fonte: ROMANO *et al.*, 2009)

Casali *et al.* (2001) também testaram a produção de argamassas industrializadas a diferentes tempos. Os autores observaram que maiores tempos de mistura aumentaram os teores de ar incorporado e reduziram a massa específica e a resistência à compressão das argamassas avaliadas (Figura 7).

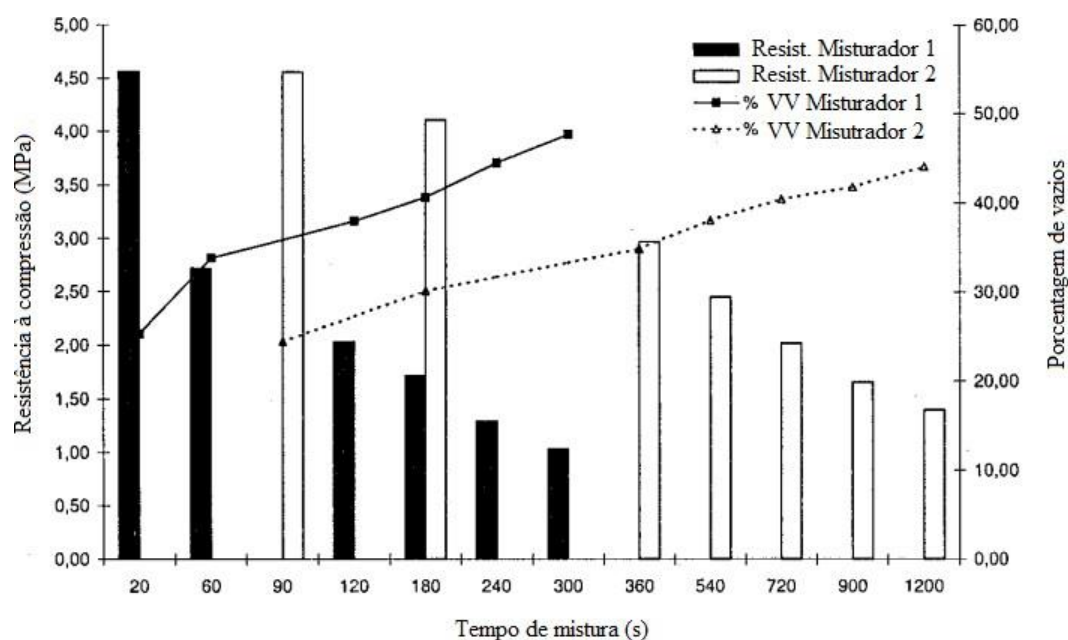


Figura 7 Resistência à compressão e porcentagem de vazios conforme o tempo de mistura empregado para a produção de argamassas industrializadas (Fonte: CASALI *et al.*, 2001)

Conforme descrito por Antunes, John e Pileggi (2005), a sequência de mistura, ou seja, a ordem com a qual os materiais são adicionados ao misturador, também possui um papel relevante. Contudo, esse é um tema pouco explorado nas pesquisas e, de forma geral, só é levado em conta quando os materiais utilizados apresentam elevadas taxas de absorção, como é o caso dos RCD. Desse modo, outra questão a ser considerada é a ordem de introdução da água na mistura. Plawsky *et al.* (2003) e Park *et al.* (2006) citam também a importância da pré-mistura dos materiais ainda secos para promover uma melhor dispersão das partículas, principalmente dos grãos de cimento, que apresentam elevada superfície específica.

Antunes, John e Pileggi (2005) testaram ordens distintas de adição dos materiais nas misturas, avaliando duas sequências diferentes. Na primeira adicionou-se a água ao cimento e areia previamente misturados (A-P) e na segunda, misturou-se os materiais anidros na água (P-A). O procedimento A-P proporcionou um aumento do índice de consistência quando comparado ao método de mistura P-A. Os espalhamentos, conforme citado pelos autores, chegaram a ser 15 % inferiores para a última sequência (Figura 8), visto a menor viscosidade apresentada pela sequência A - P.

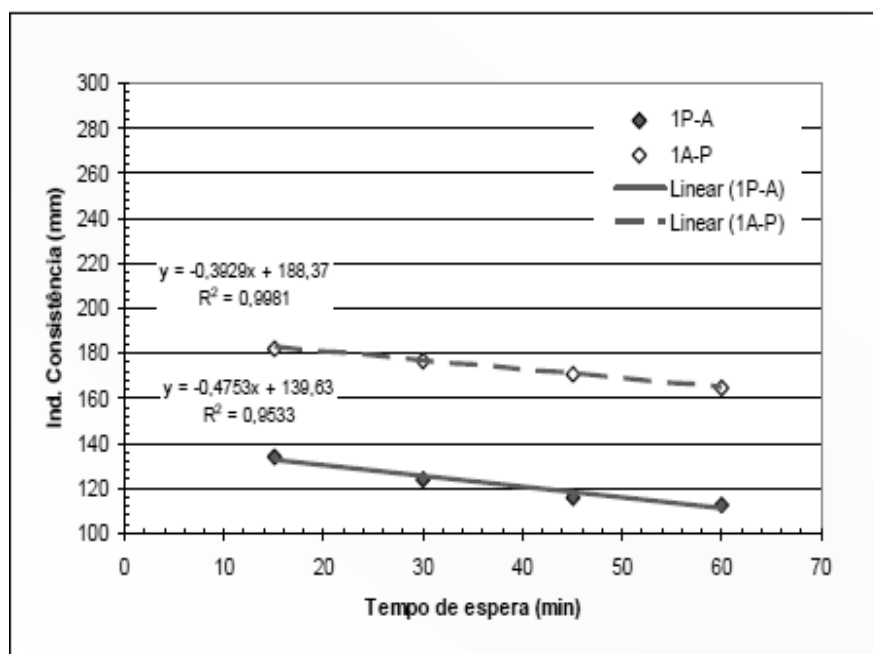


Figura 8 Influência da sequência de mistura no índice de consistência em função do tempo de espera para a amostra com 15% de teor de água (Fonte: ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005)

Essa percepção foi semelhante aos resultados de Antunes (2005) que também utilizou duas variações de sequências (A-P e P-A) conforme descritas no parágrafo anterior. Nesse

estudo, as viscosidades das argamassas foram analisadas por meio do ensaio de squeeze-flow. Os resultados dos ensaios indicaram uma necessidade de carga 11,4 vezes maior para a sequência P-A, ou seja, as misturas produzidas por meio desse método são mais viscosas, corroborando o que foi identificado por Antunes, John e Pileggi (2005). O autor explicou que para a sequência A-P, a água foi adicionada de forma fracionada e, por isso, permitiu que as partículas aglomeradas fossem rompidas de forma mais eficiente, de modo que a mistura se tornou menos viscosa. Na Figura 9 há uma representação esquemática de como as sequências P-A e A-P se comportaram quanto à desaglomeração das partículas finas.

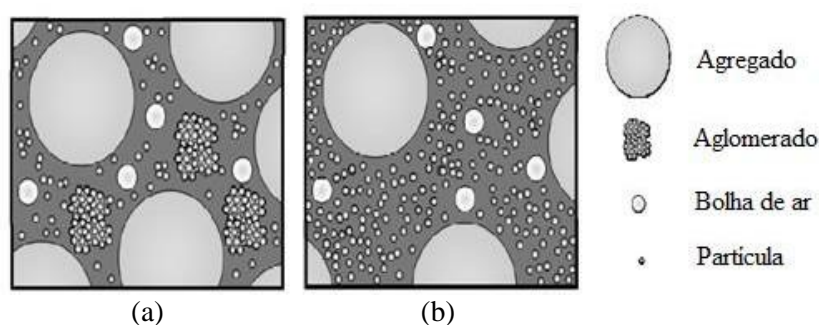


Figura 9 Representação esquemática da presença de aglomerados de partículas em função da sequência de mistura: a) Sequência P-A; b) Sequência A-P (Fonte: ANTUNES, 2005)

Desse modo, verifica-se que o tema mistura, muitas vezes tratado como apenas mais uma etapa do procedimento experimental das argamassas, deve ser sempre levado em consideração, pois pode trazer efeitos significativos às propriedades do produto final. Vale enfatizar que para as misturas com AR de RCD há a necessidade de maior atenção às características dos materiais que possuem alto potencial de absorção e características físicas muito distintas em comparação aos AN.

2.3.2 Tipos de misturas para argamassas

Como mencionado, o método de mistura é capaz de promover modificações nas propriedades das argamassas (ROMANO *et al.*, 2009). Entretanto é importante salientar que a metodologia utilizada deve ser suficientemente adequada para promover a boa homogeneidade da argamassa e deve levar em consideração as particularidades dos materiais que a constitui.

No que tange a produção de argamassas com RCD, de um modo geral, a maioria das misturas com AR têm sido produzidas por meio de técnicas normatizadas para materiais convencionais, como verificado nos trabalhos de Jiménez *et al.* (2013), que utilizaram a

EN 196-1 (1994), Neno, Brito e Veiga, (2014) conforme a norma EN 1015-2 (1998) e Malta *et al.* (2013) que empregaram os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 1996).

A utilização do AR é dificultada pelo elevado potencial de absorção dos RCD, alto teor de material pulverulento e formato mais irregular e mais rugoso das partículas (LEDESMA *et al.*, 2015; MARTÍNEZ *et al.*, 2016). Nesse sentido, é imprescindível o estudo de sequências de misturas que levem em consideração essa problemática. É importante enfatizar também que pesquisas nesse campo ainda são escassas, como já foi mencionado por Silva Neto e Leite (2018).

No Brasil, um método tradicional bastante utilizado na produção de argamassas é o da NBR 7215 (ABNT, 2019), o qual recomenda que a água seja adicionada em apenas uma etapa. Essa norma preconiza que inicialmente a água seja colocada no recipiente e, posteriormente, se adicione os materiais secos (sequência do tipo P-A, como visto no item 2.3.1). O tempo de mistura é de 240 s e todo o procedimento é apresentado na Figura 10.

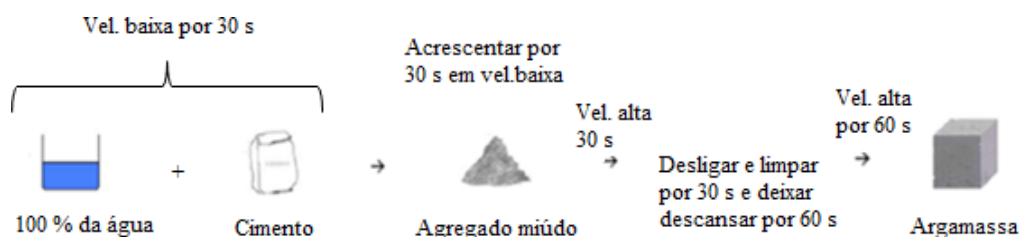


Figura 10 Representação esquemática do método da NBR 7215 (ABNT, 2019)

Já a NBR 16541 (ABNT, 2016) que normatiza o preparo das argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, sugere que todo material seco deve ser colocado na cuba e, subsequentemente, a água vai sendo adicionada em etapas (sequência do tipo A-P, como identificado no item 2.3.1), conforme pode ser visto na Figura 11. Esse procedimento também é realizado em um tempo de 240 s.

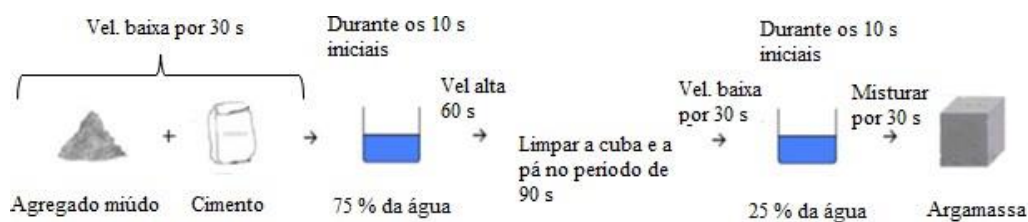


Figura 11 Representação esquemática do método da NBR 16541 (ABNT, 2016)

Plawsky *et al.* (2003) e Park *et al.* (2006) adotaram um procedimento de mistura semelhante para avaliar a produção de argamassas (Figura 12). Tal procedimento tem como intuito a pré-mistura dos materiais anidros. Nos dois trabalhos os autores notaram que essa sequência permitiu que o cimento se dispersasse de forma mais homogênea e também a quebra dos aglomerados foi mais eficiente, tendo um desempenho semelhante às argamassas preparadas com equipamentos de alto poder de cisalhamento.

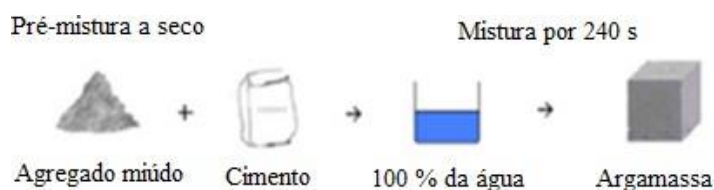


Figura 12 Representação esquemática do método com pré-mistura a seco do estudo de PARK *et al.* (2006)

Silva Neto e Leite (2018) utilizaram o método de mistura em duas etapas (MDE) para produzir argamassas com AR. Os autores verificaram que, de forma geral, o uso desse método pode causar melhoria em algumas propriedades das argamassas no estado endurecido, como a resistência à tração e à compressão, por exemplo. Isso quando comparadas às misturas produzidas conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996). A metodologia é descrita na Figura 13 e leva um tempo total de 210 s.



Figura 13 Representação esquemática do método MDE (Fonte: SILVA NETO; LEITE, 2018)

Já França (2013) em sua pesquisa testou três novos métodos. No primeiro (N30s) toda a água é colocada na cuba e em seguida o material anidro (Figura 14). O tempo de mistura é contabilizado em 60 s. O autor concluiu que períodos muito curtos, pois esse tempo é inferior ao demais analisados, não são suficientes para deixar as argamassas adequadamente homogêneas.

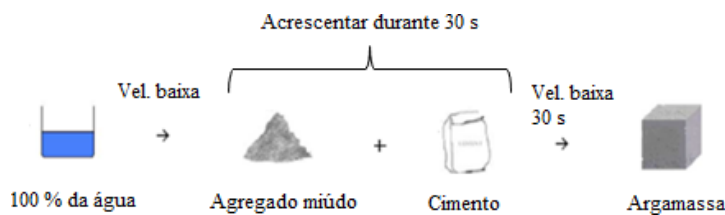


Figura 14 Representação esquemática do método N30s do estudo de França (2013)

No segundo procedimento (F50.50%) a argamassa anidra é introduzida e, posteriormente, a água em duas etapas, sendo intercalada pelo acionamento do misturador por 60 s, conforme representado na Figura 15. O processo total contabilizou 120 s. Para esse sistema o autor já percebeu uma melhora na fluidez, avaliada pelo ensaio de squeeze-flow, quando comparada à mistura N30s, descrita na Figura 14.

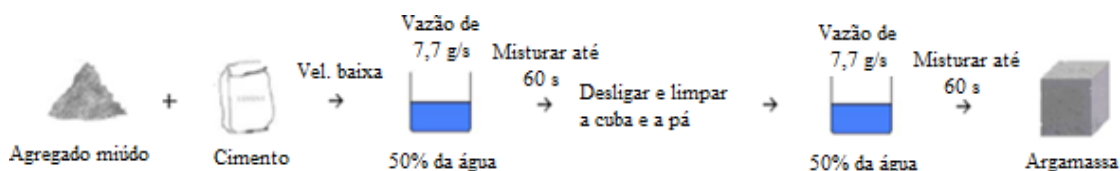


Figura 15 Representação esquemática do método F50.50% do estudo de França (2013)

França (2013) ainda testou mais dois métodos fracionados F25.75%_120s e F25.75%_180s, os quais possuem etapas parecidas, diferindo apenas o tempo total de mistura que são de 120 e 180 s, respectivamente (Figura 16 e Figura 17). Esses sistemas foram avaliados pelo ensaio de squeeze-flow e foi verificado que produziram argamassas com maior fluidez quando comparados a procedimentos em apenas uma etapa.

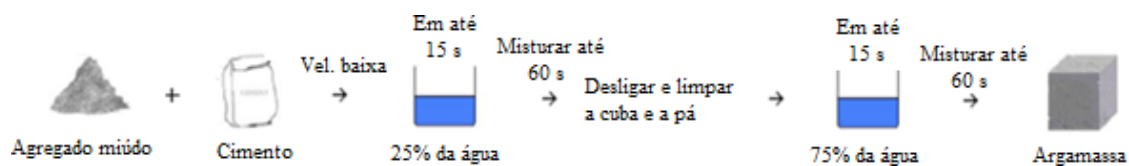


Figura 16 Representação esquemática do método F25.75%_120s do estudo de França (2013)

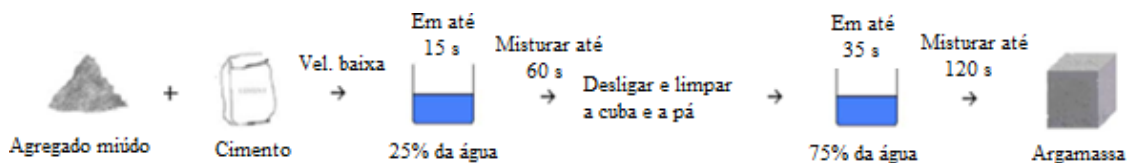


Figura 17 Representação esquemática do método F25.75%_180s do estudo de França (2013)

Como foi possível perceber, existem diferentes sequências de mistura descritas na literatura. Dentre as metodologias estudadas, algumas ações são importantes para o bom

desempenho das argamassas como, por exemplo, a adição de água de forma fracionada e a inserção de todo o material seco seguido pela fase líquida. Esses processos já vêm sendo adotados por alguns métodos, inclusive normatizados, como é o caso da NBR 16541 (ABNT, 2016). Vale salientar que essa norma ainda é pouco utilizada para a produção de argamassas com AR de RCD, visto que é uma metodologia relativamente recente.

2.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS RECICLADAS

A literatura aponta que o uso de AR de RCD, bem como, os diferentes processos de mistura empregados na produção de argamassas podem interferir nas suas propriedades. Com base nisso, nesse tópico serão discutidos os efeitos dessas variáveis levando em consideração as modificações que podem ocasionar no comportamento das argamassas tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

2.4.1 Propriedades no estado fresco

2.4.1.1 Consistência

A consistência está associada a capacidade de deformação com a aplicação de cargas, de forma geral, é indicada na literatura como medida de trabalhabilidade para as argamassas. Segundo Ferreira *et al.* (2019a), para essa propriedade apresentar um bom desempenho, os materiais constituintes das misturas devem apresentar baixo atrito interno e alta coesão. Com base nisso, percebe-se que a relação a/c, o tipo de material empregado, a sequência de mistura e a utilização de aditivos são variáveis que podem interferir nessa propriedade (ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005; JESUS *et al.*, 2019; LEDESMA *et al.*, 2015; MONTE JÚNIOR, 2017).

Martínez *et al.* (2016) e Cuenca-Moyano *et al.* (2020) descreveram a influência do AR na consistência das argamassas e perceberam que a incorporação desse tipo de material nas misturas tende a promover uma redução do espalhamento. Conforme indicado na revisão de literatura, a alta taxa de absorção de água, que reduz a relação a/c efetiva da mistura, a maior angulosidade, a elevada rugosidade e o alto teor de material pulverulento do AR fazem com que seja necessária uma quantidade de água de amassamento mais elevada para que as misturas apresentem uma boa trabalhabilidade.

De forma geral, a Figura 18 indica que quanto maior a proporção de AR utilizado na produção das argamassas, maior também tende a ser a perda de trabalhabilidade das

misturas, sendo necessária uma maior relação a/c para obter o espalhamento definido no estudo.

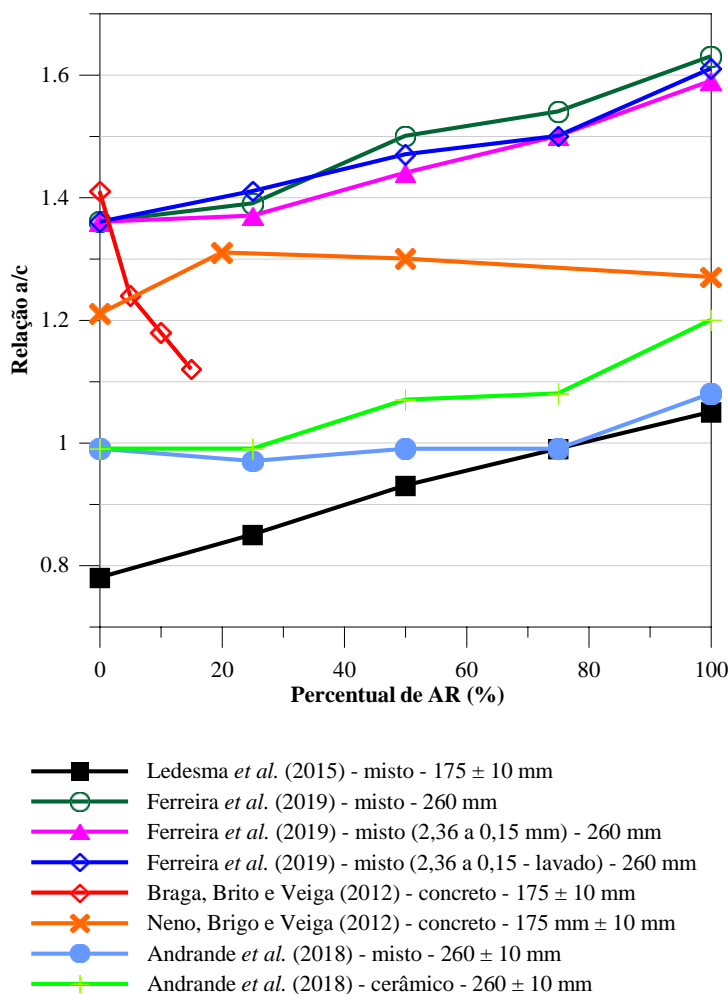


Figura 18 Relação entre a demanda de água *versus* percentual de AR, identificada em dados da literatura

Também é perceptível que Braga, Brito e Veiga (2012) ao utilizarem teores de 5 %, 10 % e 15 % de AR de concreto verificaram em sua pesquisa uma redução na quantidade de água de mistura para atingir uma consistência dentro da faixa limite de 175 ± 10 mm. Esse comportamento foi associado ao maior preenchimento de vazios promovido pelos finos contidos no agregado. Contudo, esse comportamento pode ser válido apenas para teores muito baixos de substituição do agregado natural pelo reciclado.

Dada à condição supracitada, é importante se atentar para a quantidade de água adicionada às misturas para corrigir a trabalhabilidade, uma vez que esta pode afetar negativamente as propriedades mecânicas das argamassas, assim como, promover um aumento da porosidade do material no estado endurecido (JIMENEZ *et al.*, 2013; LE *et al.*, 2016).

Com base nos aspectos citados a respeito da presença dos RCD na composição das argamassas, percebe-se que para esse tipo de material seria mais adequado a utilização de sequências de mistura que adicionem a água de forma fracionada, que de forma geral, apresentam a tendência a proporcionar maior fluidez. Poucos são os trabalhos encontrados na literatura que avaliam o efeito do processo de mistura nas propriedades de argamassas com AR de RCD. Silva Neto e Leite (2018) estudaram a aplicação de duas sequências, com dois teores de substituição de AN por AR de RCD (20 e 40 %). Os autores verificaram um maior espalhamento para as misturas de referência produzidas por meio do método MDE, descrito na seção 2.3.2, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 Índice de consistência conforme o método de mistura

Sequência de mistura	REF	20% MFRA	40% MFRA
	C ± SD (CV) mm ± mm (%)	C ± SD (CV) mm ± mm (%)	C ± SD (CV) mm ± mm (%)
NBR 7215	270 ± 1,1 (0,4)	265 ± 0,2 (0,1)	243 ± 0,5 (0,2)
MDE	276 ± 0,2 (0,1)	248 ± 1,4 (0,6)	230 ± 5,7 (2,5)

Fonte: Silva Neto e Leite (2018).

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; MFRA – agregado fino reciclado de argamassa.

Já as argamassas com AR apresentaram comportamento inverso, que foi associado à sequência de adição de material à mistura. Os autores descrevem que o primeiro passo é adicionar os agregados (RCD e natural) com 50 % da água. Esse fator pode ter influenciado para que houvesse maior absorção da água da mistura, uma vez que não houve compensação da taxa de absorção do AR e possibilitou uma perda mais acentuada da água livre. Dessa forma, verifica-se que esse método apresentou bons resultados para as argamassas de referência, contudo, para as argamassas recicladas houve perda de espalhamento de 6 % e 5 % para as misturas com 20 % e 40 %, respectivamente. Esse trabalho indica que é importante o desenvolvimento de pesquisas para argamassas recicladas, pois os comportamentos podem divergir, quando comparadas as misturas produzidas apenas com materiais naturais.

2.4.1.2 Retenção de água

A retenção de água é uma propriedade de grande relevância para as argamassas no estado fresco. Carasek (2010) define como uma característica que é necessária para que as argamassas mantenham a sua trabalhabilidade ao longo do tempo quando estariam submetidas a condições que estimulem a perda de água, tais como: alto potencial de

sucção da superfície de contato ou evaporação da água para o meio, dadas as condições de temperatura e umidade relativa do ar.

No estado endurecido, a permanência da água de mistura por um maior período de tempo favorece as reações de hidratação do aglomerante e promove uma elevação da resistência mecânica. Além disso, pode influenciar positivamente na retração por secagem, pois evita que a água livre seja perdida de forma brusca (JOCHEM, 2012; MORALES, 2015).

A substituição de AN por AR de RCD pode proporcionar uma boa retenção de água. Esse fenômeno é atribuído ao grande percentual de finos presente nos materiais reciclados, assim como, a sua alta porosidade e superfície específica, que são capazes de reter uma maior quantidade de água de amassamento quando comparada à argamassa composta apenas por agregados convencionais (MARTÍNEZ *et al.*, 2016; NENO; BRITO; VEIGA, 2014; SILVA; BRITO; DHIR, 2016). Os valores contidos na Tabela 5 mostram o comportamento citado.

Tabela 5 Comparação de resultados de literatura para retenção de água de argamassas com AR e AN

Autor	Tipo de agregado	Teor de agregado (%)	Retenção de água (%)
Braga <i>et al.</i> (2012)	AN	100	63,81
	Concreto	15	79,59
Neno, Brito e Veiga (2014)	AN	100	63,81
	Concreto	20	89,26
Silva <i>et al.</i> (2015)	AN	100	72,24
	Misto	50	78,39

Quanto à influência do método de mistura na retenção de água, há poucos dados na literatura que fazem um comparativo entre essas duas variáveis para as argamassas com AR de RCD. Silva Neto e Leite (2018) verificaram em sua pesquisa que a metodologia adotada para o processo de produção das argamassas não produz efeito significativo para essa propriedade como mostrado na Tabela 6. Nesse caso é indicando que as características do agregado produzem uma maior interferência nessa propriedade.

Tabela 6 Retenção de água para argamassas com agregado reciclado de RCD

Sequência de mistura	REF	20 %MFRA	40 %MFRA
	Retenção de água \pm SD (CV)	Retenção de água \pm SD (CV)	Retenção de água \pm SD (CV)
	% \pm % (%)	% \pm % (%)	% \pm % (%)
NBR 7215	64 \pm 0,0 (0,1)	68 \pm 0,8 (1,1)	74 \pm 2,2 (2,9)
MDE	64 \pm 0,9 (1,4)	69 \pm 0,9 (1,3)	74 \pm 0,6 (0,9)

Fonte: Silva Neto e Leite (2018).

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; MFRA – agregado fino reciclado de argamassa.

Conforme descrito neste tópico, a retenção de água é influenciada diretamente pela incorporação do AR. Contudo, o método de mistura age de forma secundária, pois exerce mais influência no percentual de água adicionado na composição das argamassas e, assim, indiretamente no potencial de retenção.

2.4.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa das argamassas é determinada por meio da relação entre a massa do material e o volume ocupado pelo mesmo, é importante lembrar que também se leva em consideração os vazios contidos na mistura, que estão preenchidos por ar aprisionado. Conforme Carasek (2010), quanto menor o valor da massa específica, mais leve e trabalhável será a argamassa, visto que o esforço do operário para a sua aplicação é inferior ao de uma argamassa mais pesada. Por outro lado, quanto mais leve é uma argamassa, maior a porosidade no estado endurecido.

A literatura indica que essa propriedade pode ser influenciada pela massa específica dos materiais utilizados na sua composição e também pelo teor de ar que é incorporado durante o processo de mistura (LEDESMA *et al.*, 2015). Com base na afirmação citada, percebe-se que a utilização de AR de RCD na composição das argamassas pode promover uma alteração da densidade de massa. Segundo Ferreira *et al.* (2019a) e Girardi (2016) há um decréscimo da densidade de massa devido à maior porosidade das partículas que compõem o AR quando comparado aos agregados convencionais.

A medida que adicionam-se maiores proporções de AR às argamassas há uma alteração da densidade de massa, com tendência a redução dos valores para essa propriedade (Figura 19), sendo que com o aumento do teor de substituição, há um decréscimo mais expressivo da densidade de massa (CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; JIMÉNEZ *et al.*, 2013; NENO; BRITO; VEIGA, 2013).

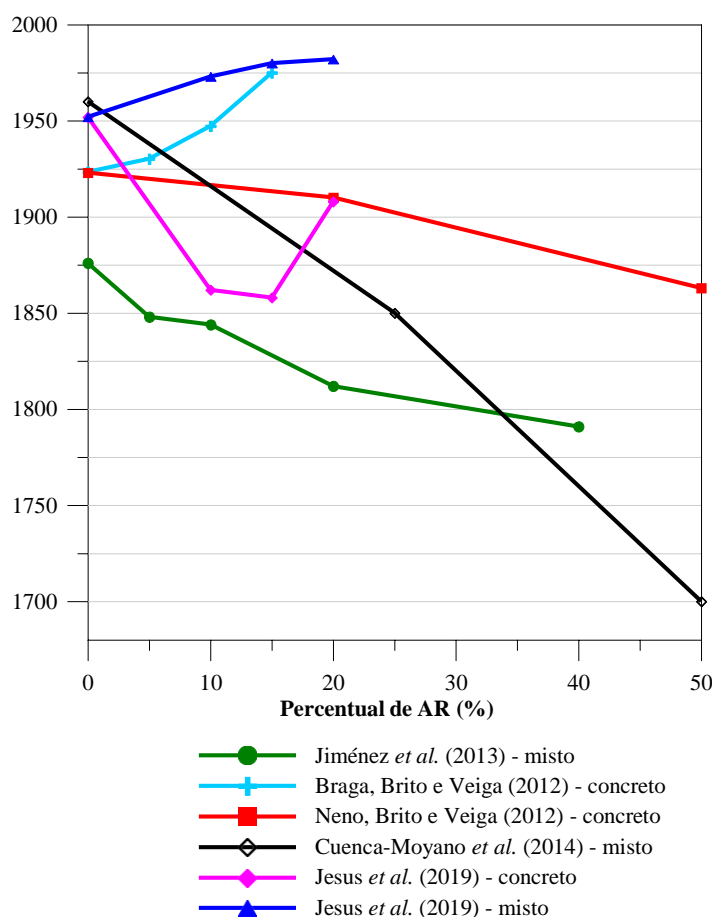


Figura 19 Resultados de literatura do comportamento das argamassas com AR quanto à densidade de massa

No gráfico da Figura 19 é possível perceber que Braga, Brito e Veiga (2012) observaram em seus resultados um incremento da densidade de massa. Comportamento semelhante foi identificado por Jesus *et al.* (2019). Para as misturas produzidas com AR de concreto, o autor justificou os resultados com o possível efeito fíler promovido pelos finos presentes no AR, que fez com que as argamassas se apresentassem mais compactas.

Quanto ao teor de ar incorporado, a literatura indica que o uso do AR pode modificar o comportamento dessa propriedade, como indicado na Figura 20. Observa-se que há variabilidade no comportamento das argamassas, Jiménez *et al.* (2013) verificaram que não houve diferença significativa entre os resultados para os diferentes percentuais avaliados. Já no estudo de Cuenca-Moyano *et al.* (2013) é possível observar o aumento da incorporação de ar com a adição de maiores percentuais de AR. Foi justificado que para essas misturas utilizou-se uma maior relação a/c que, segundo os autores, influencia diretamente no teor de ar incorporado. Contudo, Ferreira *et al.* (2019) e Ledesma *et al.* (2015) constataram a redução do teor de ar incorporado com o uso do AR. Foi explicado pelos autores que devido ao maior preenchimento de vazios promovido pelos finos

presentes na composição desses materiais, as argamassas se tornaram mais densas e com menor concentração de ar incorporado.

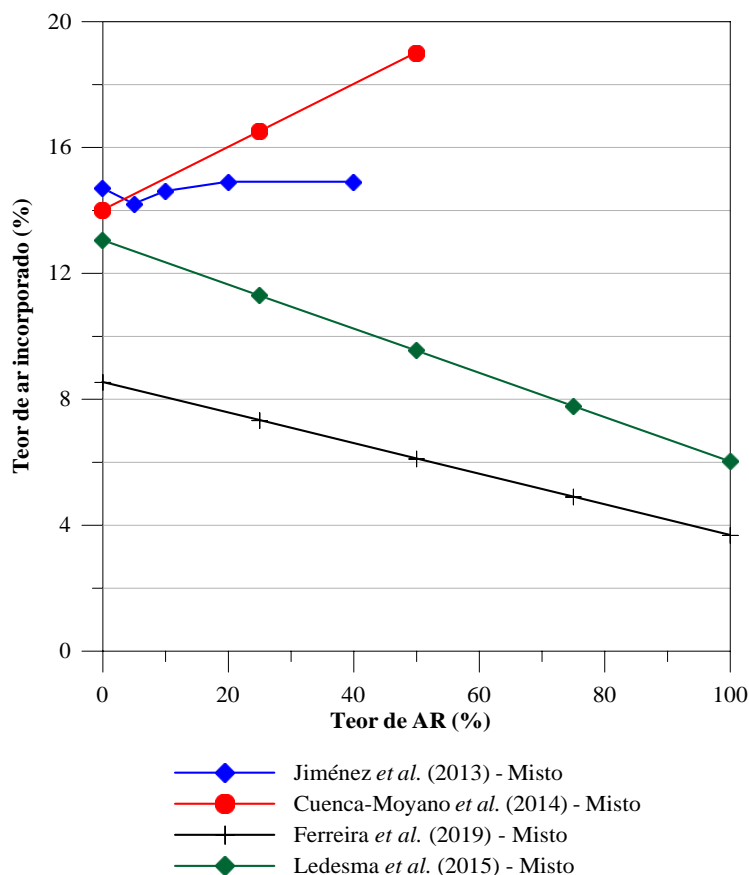


Figura 20 Resultados da literatura para o comportamento de argamassas quanto ao ensaio de teor de ar incorporado

A densidade de massa e o teor de ar incorporado também podem sofrer interferência do método de mistura utilizado para a produção das argamassas, pois é durante esse processo que ocorre a incorporação de ar (CARASEK, 2010; FERREIRA *et al.*, 2019a). Contudo Silva Neto e Leite (2018), que estabeleceram um comparativo entre o método MDE e a sequência definida pela NBR 7215 (ABNT, 1996), não identificaram influência expressiva no teor de ar das argamassas produzidas por diferentes sequências, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 Teor de ar incorporado das argamassas avaliadas por Silva Neto e Leite (2018)

Sequência de mistura	REF	20%MFRA	40%MFRA
	Teor de ar \pm SD (CV) % \pm % (%)	Teor de ar \pm SD (CV) % \pm % (%)	Teor de ar \pm SD (CV) % \pm % (%)
NBR 7215	8,2 \pm 0,32 (3,9)	7,0 \pm 0,27 (3,9)	5,5 \pm 0,64 (11,6)
MDE	8,7 \pm 0,05 (0,5)	7,0 \pm 0,06 (0,8)	5,7 \pm 0,34 (6,0)

Fonte: Silva Neto e Leite (2018).

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; MFRA – agregado fino reciclado de argamassa.

Os autores identificaram que o teor de ar incorporado sofreu maior interferência da proporção AR de RCD nos traços. Foi justificado que esse tipo de material apresenta boa distribuição granulométrica e, com isso, aumentou a densidade das misturas (Tabela 8).

Tabela 8 Densidade de massa das argamassas avaliadas por Silva Neto e Leite (2018)

Sequência de mistura	REF	20%MFRA	40%MFRA
	Densidade \pm SD (CV) kg/m ³ \pm kg/m ³ (%)	Densidade \pm SD (CV) kg/m ³ \pm kg/m ³ (%)	Densidade \pm SD (CV) kg/m ³ \pm kg/m ³ (%)
NBR 7215	2029 \pm 7.0 (0.3)	2037 \pm 6.0 (0.3)	2049 \pm 13.9 (0.7)
MDE	2018 \pm 1.0 (0.1)	2037 \pm 1.3 (0.1)	2045 \pm 7.4 (0.4)

Fonte: Silva Neto e Leite (2018).

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; MFRA – agregado fino reciclado de argamassa.

De forma geral é perceptível que tanto o uso do AR, quanto o método de mistura são variáveis relevantes para a densidade de massa e o teor de ar incorporado das argamassas. Contudo, é importante levar em consideração que no estado fresco o incremento dessas propriedades pode propiciar às argamassas uma melhor trabalhabilidade. Já no estado endurecido, provoca interferência no desempenho mecânico, pois há uma maior concentração da porosidade das argamassas, o que pode ser prejudicial a sua durabilidade e resistência de aderência, principalmente.

2.4.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido

2.4.2.1 Resistência à tração e à compressão

A resistência mecânica à tração e à compressão não são as propriedades mais importantes para o bom desempenho das argamassas, visto que as argamassas devem apresentar uma boa capacidade de deformação em conjunto com a alvenaria para que se mantenha a integridade dos revestimentos sem fissurá-los (CARASEK, 2010).

Segundo Girardi (2016), o comportamento das argamassas quanto a resistência à compressão e à tração vai depender do tipo de material reciclado utilizado, do processo

de moagem, que afeta a distribuição granulométrica, da proporção de AR empregado e também da relação a/c. Vale salientar que a quantidade de água utilizada na mistura, de forma geral, tem relação direta com o potencial de absorção do agregado e a sua superfície específica.

De forma geral, a resistência à compressão e à tração apresentam comportamentos variáveis quando se emprega diferentes percentuais de AR na composição das argamassas. Na literatura foram encontrados trabalhos que identificaram o incremento da resistência mecânica, conforme se observa na Figura 21 (BRAGA; BRITO; VEIGA, 2014; CUENCA-MOYANO *et al.*, 2014; JIMÉNEZ *et al.*, 2013; NENO; BRITO; VEIGA, 2014). Dentre as possíveis justificativas foram citadas a maior absorção do AR, que promove o preenchimento da zona de transição entre pasta e agregado com os produtos de hidratação do cimento, a superfície mais angular e rugosa do AR, que aumenta a aderência e o efeito fíler das partículas finas (grãos menores que 75 μm).

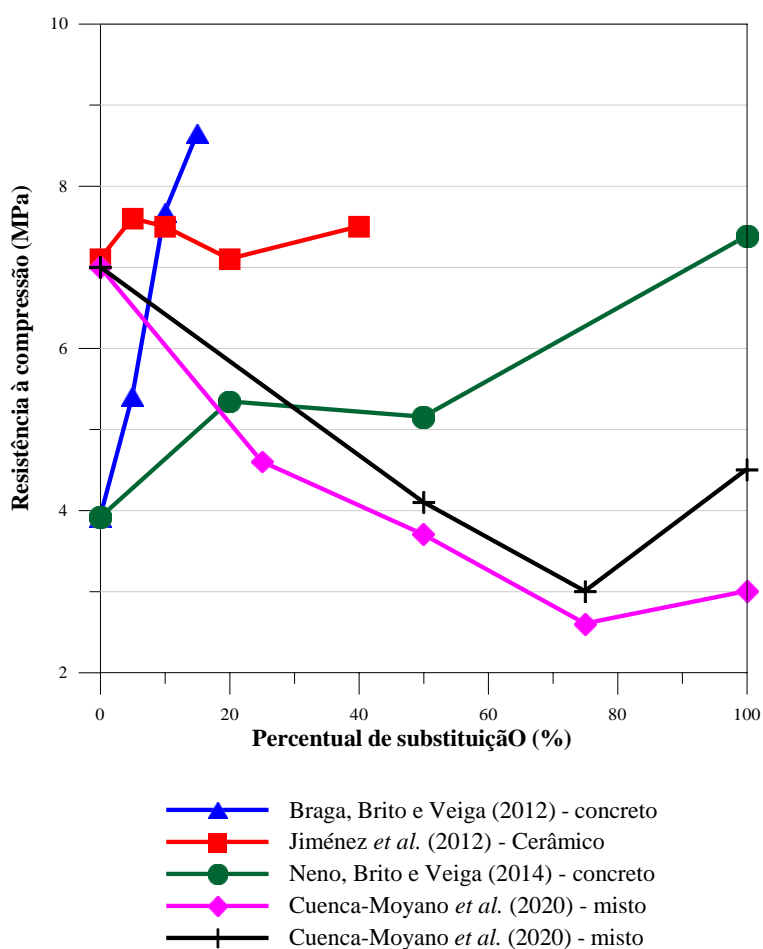


Figura 21 Resultados de literatura da resistência à compressão de argamassas recicladas

Em contrapartida, em outros estudos foi observada uma redução para a resistência mecânica à compressão das argamassas produzidas com diferentes teores de AR (LEDESMA *et al.*, 2015; ZHAO, *et al.*, 2015). A maior absorção do AR, assim como, um alto teor de finos aumenta a demanda de água para a produção das argamassas e a maior relação a/c na mistura acaba sobrepondo os efeitos supracitados do AR.

Silva, *et al.* (2016) fizeram um levantamento bibliográfico sobre as propriedades de argamassas produzidas com variação nos percentuais de AR. Ao avaliar os resultados de resistência mecânica os autores verificaram que misturas com maiores relações a/c tendem a apresentar maiores resistências ao incorporar o AR. Contudo, para valores mais baixos de a/c há uma tendência a diminuição da resistência à compressão. Isso é justificado pelo fato de que a resistência da pasta é elevada quando há uma baixa relação a/c e o AR passa a ser o componente mais frágil. Para uma maior relação a/c, a resistência do agregado tem menor intervenção, e nesse caso, o maior travamento entre a pasta e o agregado promove uma melhor resistência.

Conforme descrito neste tópico, a resistência à compressão e à tração é influenciada diretamente pelo uso do AR, contudo a literatura também indica que essas propriedades também sofrem interferência quanto ao tipo de mistura empregado. Silva Neto e Leite (2018) avaliaram a resistência à compressão e a resistência à tração de misturas produzidas usando a NBR 7215 (ABNT, 1996) e a sequência MDE. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

Tabela 9 Resistência mecânica das argamassas recicladas avaliadas por meio de dois métodos de mistura

Resistência à flexão (28 dias)			
	REF	20% MFRA	40% MFRA
Sequência de mistura	ft ± SD (CV) MPa ± MPa(%)	ft ± SD (CV) MPa ± MPa(%)	ft ± SD (CV) MPa ± MPa(%)
NBR 7215	4,2 ± 0,4 (8,3)	6,0 ± 0,3(4,2)	5,8 ± 0,3 (4,5)
MDE	6,1 ± 0,1 (1,2)	6,3 ± 0,2 (2,7)	6,9 ± 0,5 (7,2)
Resistência à compressão (28 dias)			
	REF	20% MFRA	40% MFRA
Sequência de mistura	ft ± SD (CV) MPa ± MPa(%)	ft ± SD (CV) MPa ± MPa(%)	ft ± SD (CV) MPa ± MPa(%)
NBR 7215	13,5 ± 0,4 (2,8)	14,9 ± 0,3 (2,1)	17,5 ± 0,3 (2,0)
MDE	14,3 ± 0,2 (1,6)	16,2 ± 0,3 (1,8)	16,7 ± 0,4 (2,3)

Fonte: Silva Neto e Leite (2018).

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; MFRA – agregado fino reciclado de argamassa.

O método MDE melhorou o desempenho mecânico das argamassas quando comparado à sequência da NBR 7215 (ABNT, 1996). Esse incremento pode estar relacionado à redução da relação a/c, uma vez que o agregado inicialmente entrou em contato com água de mistura e, assim, houve uma maior absorção. Conforme descrito por Neno, Brito e Veiga (2014) e Jiménez (2013), a água retida pode promover uma hidratação tardia dos grãos anidros de cimento e contribuir para melhoria das resistências mecânicas.

A revisão de literatura permitiu verificar que a utilização do AR de RCD, apesar de em alguns casos promover a redução da resistência mecânica, não torna inviável a sua utilização na produção de argamassas, uma vez que essa propriedade não requer valores elevados para o bom funcionamento dos sistemas de argamassa à base de cimento. Quanto à influência do método de mistura, verifica-se que procedimentos que utilizam água de forma fracionada podem contribuir de forma positiva para o desempenho das argamassas, em função da melhor desaglomeração dos grãos.

2.4.2.2 Retração por secagem

A retração das argamassas está relacionada à variação de volume das argamassas, principalmente devido à perda de água da pasta de cimento. Dessa forma, quanto maior for a relação a/c utilizada na mistura, mais elevada será a retração observada (SILVA *et al.*, 2016).

Conforme já foi discutido em outras seções, as características dos grãos de AR de RCD, de forma geral, fazem com que as misturas tenham uma maior demanda por água de amassamento. Portanto, argamassas com AR estariam mais suscetíveis a uma retração mais acentuada, quando comparadas a argamassas convencionais. Silva *et al.* (2016) também apontam que o menor módulo de elasticidade, normalmente identificado para os AR, faz com que estes materiais sejam menos resistentes que os agregados convencionais, quanto ao processo de retração.

Girardi (2016) e Ledesma *et al.* (2015) verificaram uma maior retração por secagem para as argamassas com AR. Esse comportamento foi justificado devido uma maior relação a/c para as argamassas recicladas.

Na literatura o comportamento supracitado é identificado por vários autores. Lima e Leite (2012), por exemplo, observaram uma retração superior para os traços compostos com

AR (RM1 e RM2), em comparação as misturas de referência (NM1 e NM2) como indicado na Figura 22.

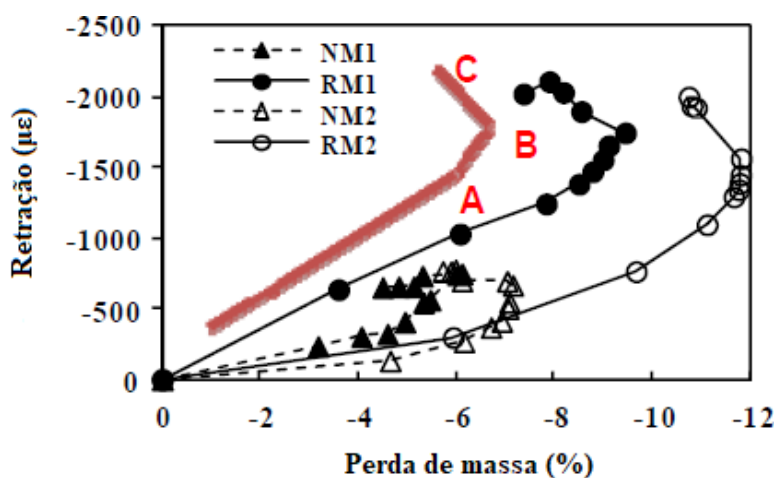


Figura 22 Retração por secagem *versus* perda de massa do estudo de Lima e Leite (2012)

Silva *et al.* (2016) também citam que o maior percentual de substituição do AN por AR tende a elevar essa variação do volume. Nessa pesquisa foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de verificar a evolução da retração de argamassas recicladas produzidas com diferentes percentuais de AR. Foi constatado que conforme aumentava-se a proporção de RCD na composição da mistura, havia um incremento na retração como indicado na Figura 23.

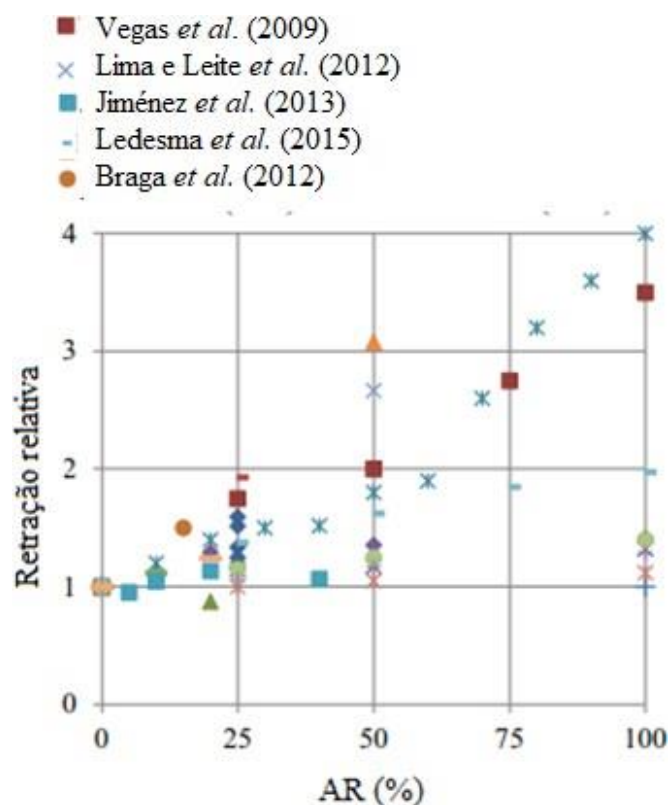


Figura 23 Retração relativa para argamassas estudadas por Silva *et al.* (2016)

Conforme já foi discutido anteriormente, a relação a/c é uma variável que influencia diretamente no comportamento das argamassas em face à retração. Pois, quanto maior a quantidade de água, maior também será a tendência à evaporação durante o processo de secagem das argamassas. Com base nessa informação, percebe-se que utilizar um método de mistura que possibilite a redução da relação a/c pode ser relevante para essa propriedade.

2.4.2.3 Massa específica, porosidade e absorção de água

O estudo da absorção de água para as argamassas é importante, uma vez que traços com elevados índices de absorção estão mais suscetíveis a entrada de água e outros agentes externos que sejam prejudiciais ao bom funcionamento dos sistemas argamassados. Conforme Silva *et al.* (2016), em função dessa propriedade também é possível avaliar, indiretamente, a durabilidade das argamassas.

As argamassas produzidas com AR, de forma geral, apresentam uma maior absorção quando comparadas as misturas convencionais. Esse comportamento é associado a maior capacidade de absorção que os materiais provenientes do RCD tendem a apresentar e

também pela relação a/c mais elevada para as misturas produzidas com esse tipo de material (ANDRADE *et al.*, 2018; CORINALDESI, 2009, FERREIRA *et al.*, 2019a).

Martinez *et al.* (2016) em seu estudo verificaram três tipos de AR (cerâmico, misto e de concreto) na produção de argamassas e constataram que as amostras produzidas com o material cerâmico foram as que apresentaram maior tendência a absorção. Também foi observado que a capacidade de absorção foi proporcional ao teor de material reciclado na mistura.

A massa específica é uma propriedade das argamassas que está diretamente relacionada à sua porosidade, assim como, aos materiais constituintes. Da mesma forma que os materiais oriundos do RCD interferem nos valores de absorção, a literatura indica que a incorporação de AR às misturas produzem argamassas menos densas e mais porosas. Esse fator é associado a menor massa específica que os agregados apresentam (FERREIRA *et al.*, 2019b; LEDESMA *et al.*, 2015).

Quanto à influência do método de mistura na absorção e massa específica das argamassas, é importante enfatizar que o teor de ar incorporado tem grande importância para que as argamassas apresentem menor densidade também no estado endurecido (CASALI *et al.*, 2001; NAKAKURA; CINCOTTO, 2001).

Silva Neto e Leite (2018) investigaram o efeito do método MDE e do método da NBR 7215 (ABNT, 1996) sobre o índice de vazios de argamassas convencionais e recicladas. Os valores obtidos para essa propriedade estão apresentados na Tabela 10, na qual é possível observar que os métodos de mistura utilizados não ocasionaram grande interferência nessa propriedade.

Tabela 10 Avaliação do índice de vazios de argamassas com RCD por meio de dois métodos de mistura

Sequência de mistura	REF	20%MFRA	40%MFRA
	Índice de vazios ± SD (CV)	Índice de vazios ± SD (CV)	Índice de vazios ± SD (CV)
	% ± % (%)	% ± % (%)	% ± % (%)
NBR 7215	25,4±1,15(4,5)	24,6±0,30(1,2)	24,8±0,69(2,8)
MDE	25,2±0,71(2,8)	24,9±0,56(2,3)	23,7±0,33(1,4)

Fonte: Silva Neto e Leite (2018).

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; MFRA – agregado fino reciclado de argamassa.

A taxa de absorção de água seguiu a mesma tendência dos resultados de índice de vazios (Tabela 11).

Tabela 11 Análise da taxa de absorção de água para argamassas produzidas com RCD por meio de dois métodos de mistura

Sequência de mistura	REF	20% MFRA	40% MFRA
	Taxa de absorção ± DP (CV)	Taxa de absorção ± DP (CV)	Taxa de absorção ± DP (CV)
	% ± % (%)	% ± % (%)	% ± % (%)
NBR 7215	13,54±0,73(5,4)	13,17±0,20(1,5)	13,19±0,41(3,1)
MDE	13,49±0,42(3,1)	13,31±0,32(2,4)	12,82±0,17(1,4)

Fonte: Silva Neto e Leite (2018).

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; MFRA – agregado fino reciclado de argamassa.

O método empregado para a mistura das argamassas pode interferir na absorção por meio da taxa de ar incorporado, ou mesmo, pelo uso de uma técnica que não contribua para a boa consistência das argamassas, fazendo com que seja necessária uma maior relação a/c para produzi-las. Dessa forma, é importante se pensar em métodos que promovam um bom desempenho das argamassas no estado fresco e, conseqüentemente, no estado endurecido, para que a sua durabilidade não seja prejudicada devido à maior porosidade.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) e tem como objetivo avaliar o comportamento de argamassas compostas por diferentes proporções de AR de RCD quando produzidas utilizando o método prescrito pela NBR 16541 (ABNT, 2016). Para tal, inicialmente foi feita a caracterização física e mecânica dos materiais utilizados, posteriormente produziu-se as argamassas e avaliaram-se as suas propriedades nos estados fresco e endurecido. Vale salientar que todos os ensaios seguiram as normas vigentes.

3.1 VARIÁVEIS DO ESTUDO

As variáveis que serviram como parâmetro para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- Variáveis fixas:
 - Traço: adotou-se um traço para a produção das argamassas de 1,00:4,00 (cimento:areia), em massa;
- Variáveis independentes:
 - Consistência: o espalhamento foi fixado em 260 ± 5 mm;
 - Teor de RCD: os percentuais adotados para substituição parcial de AN por AR foram de 15 e 30 %;
 - Idade: as argamassas no estado endurecido foram avaliadas aos 7 e 28 dias de idade, quanto à resistência à compressão, tração na flexão, absorção de água, índice de vazios e massa específica. As demais propriedades no estado endurecido foram avaliadas a partir dos 28 dias de cura, conforme descrito no item 3.4.2.
- Variáveis dependentes
 - Relação a/c: foram produzidas argamassas recicladas com correção da relação a/c para atingir o espalhamento de 260 ± 5 mm e também foram produzidas argamassas recicladas com a mesma relação a/c especificada para a mistura de referência, desta forma, houve redução do espalhamento;
 - Propriedades: essa variável está diretamente relacionada a fatores como a correção da relação a/c, o teor de AR de RCD utilizado e a idade de realização do ensaio.

3.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP II F, classe 32, cimento Portland composto com fíler, pois o mesmo é comumente encontrado na região de Feira de Santana (BA). A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos em cada ensaio, as normatizações utilizadas para a caracterização física e mecânica desse material, bem como, os limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 12 Propriedades físicas e mecânicas do cimento

Propriedade avaliada – Método de ensaio		Resultados	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
Resistência à compressão – NBR 7215 (ABNT, 2019)	3 dias	20,4 (MPa)	≥10 MPa
	7 dias	25,9 (MPa)	≥20 MPa
	28 dias	32,0 (MPa)	≥32 MPa
Massa específica – NBR 16605 (ABNT, 2017)		3,00 (g/cm ³)	N.E.
Índice de finura – NBR 11579 (ABNT, 2012)		1,26 (%)	≤12,0 %
Pasta de consistência normal – NBR 16606 (ABNT, 2018)		29,6 (%)	N.E.
Tempo de pega – NBR 16607 (ABNT, 2018)	Início de pega	2:45h	≥1h
	Fim de pega	4:15h	≤10h
Superfície específica		1181 m ² /kg	N.E.
Granulometria a laser	D ₁₀	2,16 μm	N.E.
	D ₅₀	12,70 μm	N.E.
	D ₉₀	36,60 μm	N.E.

Nota: N. E. – Não especificado.

Os valores indicam que o cimento analisado atendeu aos critérios normativos da NBR 16697 (ABNT, 2018), portanto, é adequado para a produção das argamassas desse estudo.

O cimento também foi caracterizado quanto à granulometria a laser. Para esse ensaio foi utilizado o granulômetro a laser Malvern Mastersizer 3000E com Hydro EV, disponível no Laboratório de Materiais de Construção da UEFS, e a curva obtida pode ser observada na Figura 24.

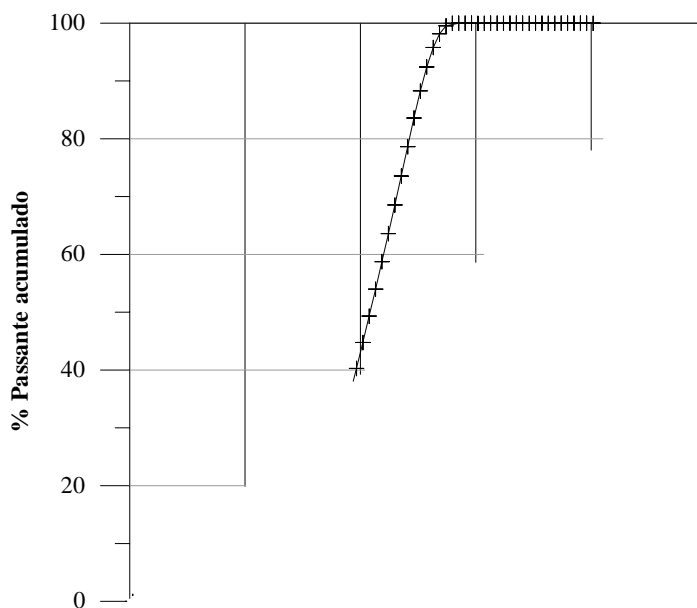


Figura 24 Curva granulométrica do CP II F – 32 utilizado nesse estudo

3.2.2 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo natural empregado na produção das argamassas foi uma areia fina quartzosa proveniente de jazidas localizadas no município de Alagoinhas (BA). Na Tabela 13 está especificada a caracterização, que seguiu as prescrições normativas vigentes.

Tabela 13 Caracterização do agregado miúdo natural

Propriedade avaliada – Método de ensaio	Resultados	
Abertura da peneira (mm)	% RI	% RA
2,4	0	0
1,2	4	4
0,6	10	14
0,3	43	57
0,15	31	88
<0,15	12	100
Módulo de finura – NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,63	
Dimensão máxima característica – NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,2 mm	
Absorção de água – NBR NM 30 (ABNT, 2001)	0,1 %	
Impurezas orgânicas – NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Mais clara que a solução padrão	
Teor de material pulverulento – NBR NM 46 (ABNT, 2003)	2,4 %	
Massa específica – NBR NM 52 (ABNT, 2009)	Aparente	2,60 g/cm ³
	S.S.S.	2,61 g/cm ³
	Seco	2,62 g/cm ³
Massa unitária – NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,60 kg/dm ³	

Nota: S.S.S. – Saturado superfície seca.

3.2.3 Agregado reciclado

O AR utilizado nesse estudo foi oriundo da pesquisa de Carneiro (2011), é um material que possui composição mista, apresentando um maior percentual de argamassa, seguido por material cerâmico e concreto, segundo a composição gravimétrica mostrada na Figura 25.

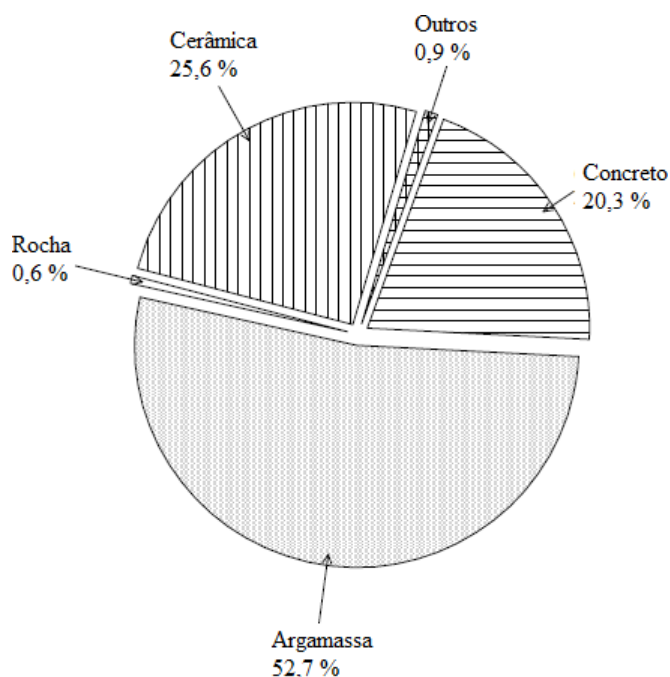


Figura 25 Composição gravimétrica do RCD utilizado nessa pesquisa (Fonte: CARNEIRO, 2011)

Optou-se por peneirar o AR para obter a fração passante na peneira com abertura da malha de 2,4 mm, com o objetivo de promover uma textura menos áspera às argamassas (Figura 26). A caracterização física dos AR consta na Tabela 14.



Figura 26 Aspecto visual do AR após peneiramento

Tabela 14		Ensaio realizado para a caracterização do agregado miúdo reciclado	
Propriedade avaliada – Método de ensaio		Resultados	
Abertura da peneira (mm)		% RI	% RA
2,4		0	0
1,2		18	18
0,6		21	39
0,3		24	63
0,15		17	80
<0,15		20	100
Módulo de finura – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		2,00	
Dimensão máxima característica – NBR NM 248 (ABNT, 2003)		2,4 mm	
Aparente		2,10 g/cm ³	
Massa específica - NBR NM 52 (ABNT, 2009)		S.S.S. 2,29 g/cm ³	
Seco		2,57 g/cm ³	
Massa unitária – NBR NM 45 (ABNT, 2006)		1,33 kg/dm ³	
Absorção de água – NBR NM 30 (ABNT, 2001)		8,6 %	
Teor de material pulverulento (%) – NBR NM 46 (ABNT, 2003)		8,6 %	
Impurezas orgânicas – NBR NM 49 (ABNT, 2001)		Mais clara que a solução padrão	
Granulometria a laser para as partículas < 75 µm		D ₁₀	4,71 µm
		D ₅₀	43,60 µm
		D ₉₀	78,30 µm
		Superfície específica	578,50 m ² /kg

Nota: S.S.S. – Saturado superfície seca.

A fração menor que 75 µm do AR também foi caracterizada quanto à granulometria (Figura 27), utilizando um granulômetro a laser Malvern Mastersizer 3000E com Hydro EV.

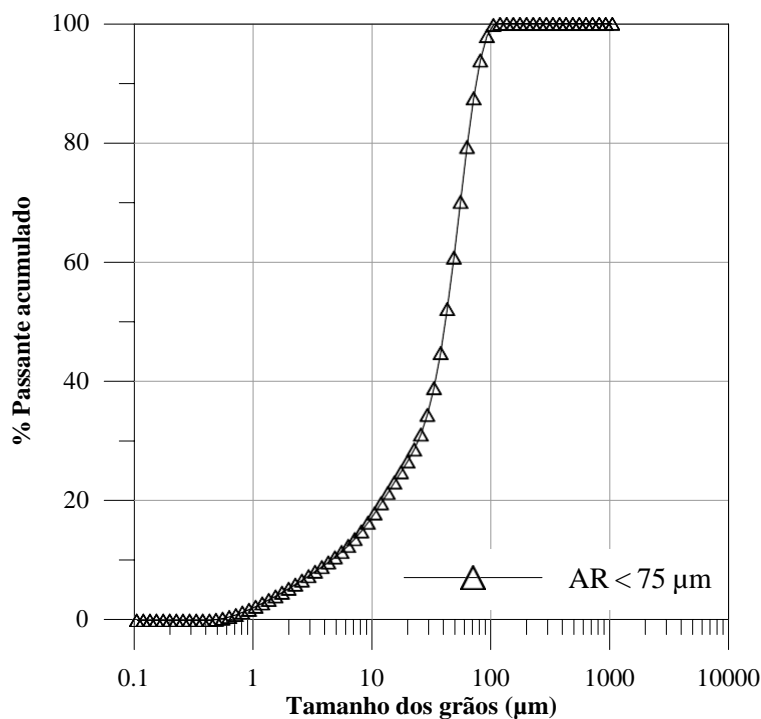


Figura 27 Curva granulométrica dos finos do AR com dimensão inferior aos 75 µm

Para esse estudo utilizou-se os teores de 15 e 30 % de substituição parcial de AN por AR de RCD. Esses percentuais foram definidos com o objetivo de permitir a avaliação das argamassas sem a correção da relação a/c, visto que, para teores acima de 30 % as misturas apresentaram um aspecto muito seco, dificultando a moldagem das argamassas. As curvas de distribuição granulométrica do AR, do AN e do agregado composto por ambos os materiais estão apresentadas na Figura 28.

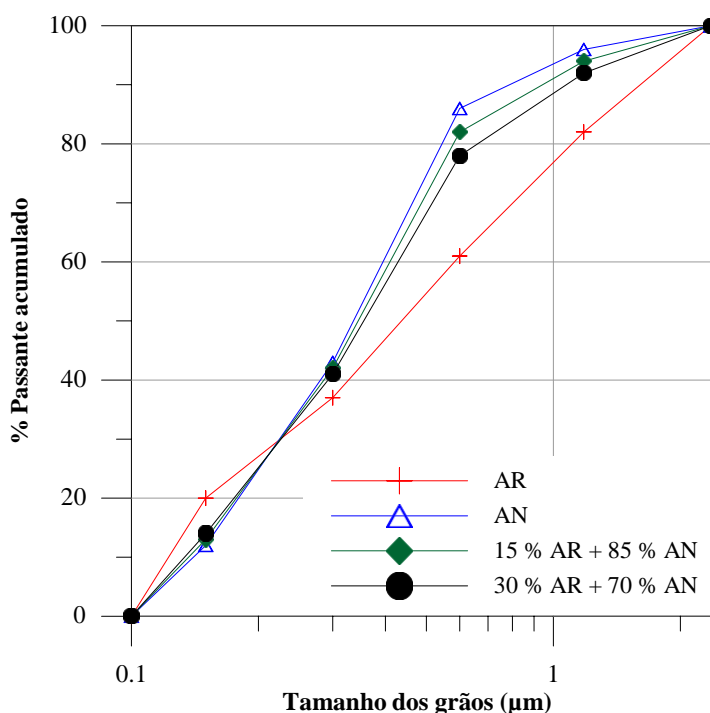


Figura 28 Curvas de distribuição granulométrica do AN, AR e composição de ambos os materiais

Nota-se uma composição bem distribuída para o AR quando comparado ao AN, entretanto, é possível observar um maior teor de partículas com granulometria inferior a 75 μm no AR, correspondente a 8,6 %. Essa condição contribui para que as argamassas compostas por material reciclado apresentem uma maior demanda de água, pois esses grãos apresentam maior superfície específica. A presença desses finos norteou a escolha de não utilizar a cal no traço, pois acredita-se que esse material já ajuda na promoção da plasticidade das argamassas. A Figura 28 também indica que as areias formadas pelas composições de AN e AR se tornaram um pouco mais grossas quando comparadas ao AN. A Tabela 15 mostra um comparativo entre a composição de areias e a areia natural. É perceptível que ao utilizar 15 e 30 % de AR nas misturas há um maior teor de finos na composição das argamassas.

Tabela 15 Características das areias compostas por AN e AR utilizadas nesse estudo

Propriedades	15 % AR + 85 % AN	30 % AR + 70 % AN	100 % AN
Dimensão máxima característica (mm)	2,4	2,4	1,2
Módulo de finura	1,68	1,74	1,63
Material pulverulento (%)	3,3	4,3	2,4
Taxa de absorção (%)	1,4	2,7	0,1

3.2.4 Água

A água utilizada para a produção das argamassas foi proveniente da rede de abastecimento da UEFS.

3.2.5 Substrato de blocos cerâmicos

Para a aplicação das argamassas do ensaio de permeabilidade foram utilizados blocos cerâmicos com dimensões de (9 x 19 x 24) cm. Esses blocos foram ensaiados quanto às propriedades recomendadas pela NBR 15270 – 2 (ABNT, 2017), conforme mostrado na Tabela 16.

Tabela 16 Resultados para o ensaio de caracterização dos blocos cerâmicos usados como substrato

Propriedades	Resultados	Limites NBR 15270 - 1
Índice de absorção de água (%)	22	8 - 22
Área líquida (cm ²)	11,93	-

Com base nos resultados obtidos na Tabela 16, os blocos avaliados estão aptos para a aplicação das argamassas de revestimento.

3.3 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

Para esse programa experimental, inicialmente foram testados três traços unitários: 1,00:6,00, 1:00:5,00 e 1,00:4,00 (cimento:agregado miúdo), em massa. Foi verificado que as argamassas sem correção da relação a/c produzidas por meio do traço 1,00:4,00 apresentaram um aspecto menos seco quando não foi realizada a correção da relação a/c, o que permitiu a moldagem das argamassas. Dessa forma, adotou-se essa proporção para a produção das argamassas desse estudo.

Para a dosagem das argamassas foram produzidos dois grupos de amostras: no primeiro grupo objetivou-se manter o índice de consistência (260 ± 5 mm) constante em todas as misturas. A quantidade de água foi verificada experimentalmente por meio do ensaio de

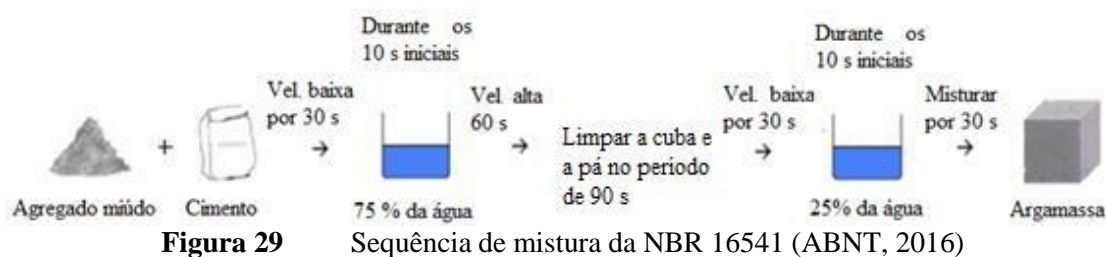
consistência, descrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016), e variou para cada uma das misturas produzidas (misturas Com Compensação da quantidade de água total, identificadas como CC). No segundo grupo foi fixada a relação a/c da argamassa de referência e posteriormente, foram produzidas as argamassas com 15 e 30 % de AR (misturas Sem Compensação da quantidade de água total, identificadas como SC). Os consumos de materiais obtidos para cada mistura estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 Consumo de materiais (kg) para a produção de um metro cúbico de argamassa produzida com o método de mistura da NBR 16541 (ABNT, 2016)

Mistura	Traço unitário, em			
	massa (cimento: areia: a/c)	Cimento	AN	AR
REF	1,00: 4,00: 0,68	394	1576	0
15%SC	1,00: 4,00: 0,68	394	1340	232
30%SC	1,00: 4,00: 0,68	394	1103	464
15%CC	1,00: 4,00: 0,72	387	1316	228
30%CC	1,00: 4,00: 0,76	382	1070	450

Para as misturas com AR realizou-se a compensação de volume, haja vista que a simples substituição do AN pelo AR de RCD, em massa, resultaria em um maior volume para a mistura produzida com o material reciclado.

As argamassas foram produzidas em uma argamassadeira de bancada que possui capacidade máxima de 5 litros e duas velocidades (alta e baixa) de mistura, atendendo aos requisitos da NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram empregados a sequência e o tempo de mistura e a forma de adição de água recomendados pela NBR 16541 (ABNT, 2016). Nesse método, os materiais anidros são adicionados ao misturador e, posteriormente, a água é incorporada de forma fracionada, contabilizando um tempo total de mistura de 240 s. Esse procedimento é descrito de forma mais detalhada na Figura 29.



Para efeito de avaliação do método de mistura estabeleceu-se um comparativo com a metodologia proposta pela NBR 7215 (ABNT, 2019), um método de adição de água em apenas uma etapa, como mostrado na Figura 30.

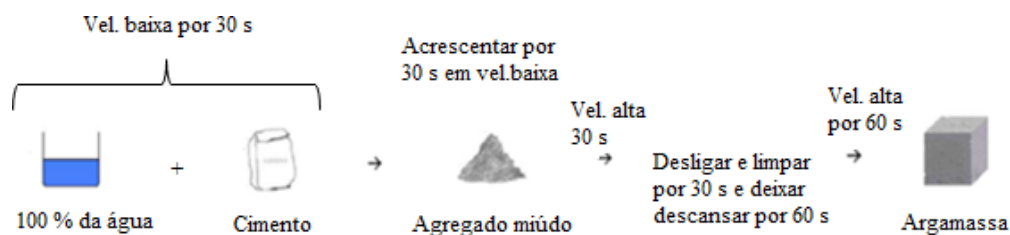


Figura 30 Sequência de mistura da NBR 7215 (ABNT, 2019)

O método da NBR 16541 (ABNT, 2016) foi avaliado de forma comparativa à metodologia da NBR 7215 (ABNT, 2019). É importante salientar que esse comparativo foi realizado apenas para o ensaio de consistência das argamassas, com o objetivo de verificar se a utilização da sequência da NBR 16541 (ABNT, 2016) provocaria alguma alteração na trabalhabilidade das argamassas avaliadas. O método da NBR 7215 (ABNT, 2019) foi selecionado, pois é um dos métodos comumente utilizados na produção de argamassas e também por ser um procedimento que preconiza a adição de água em apenas uma etapa, misturando-se os materiais anidros à fase líquida.

3.4 PROPRIEDADES AVALIADAS

3.4.1 Propriedades das argamassas no estado fresco

Em seguida ao preparo das misturas realizou-se os ensaios das argamassas no estado fresco. Para esse trabalho foi avaliada a consistência NBR 13276 (ABNT, 2016), a retenção de água, seguindo as recomendações da NBR 13277 (ABNT, 2005) e a densidade de massa e teor de ar incorporado segundo os procedimentos descritos na NBR 13278 (ABNT, 2005). Para cada mistura foram efetuadas duas determinações, cujos resultados estão apresentados no Apêndice A.

3.4.2 Propriedades no estado endurecido

No estado endurecido foram avaliadas as resistências mecânicas à tração e à compressão, retração por secagem, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, absorção de água por capilaridade e permeabilidade pelo método do cachimbo.

Para a determinação da resistência à tração na flexão e à compressão foram adotados os procedimentos recomendados pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Três amostras prismáticas com dimensões de (40 x 40 x 160) mm foram moldadas e submetidas à ruptura aos 7 e 28 dias de idade. O equipamento utilizado para a avaliação da resistência mecânica foi

uma máquina de ensaio universal estática, servo-elétrica, modelo Autograph AG IC Séries, da Shimadzu, com capacidade de carga de 100 kN, usando faixa de carga de 10 kN.

Para o ensaio de retração por secagem adotou-se as recomendações prescritas pela ASTM C 157 (2014). Essa propriedade foi avaliada inicialmente com 1, 3 e 7 dias, posteriormente fez-se leituras a cada 7 dias até as amostras completarem 56 dias de idade. Após esse período as leituras foram efetuadas de 15 em 15 dias até completar 210 dias. Para cada mistura foram moldadas e ensaiadas três amostras prismáticas com dimensões de (25 x 25 x 285) mm. Posteriormente foi montada a curva de retração *versus* perda de massa, conforme apresentado na Figura 31.

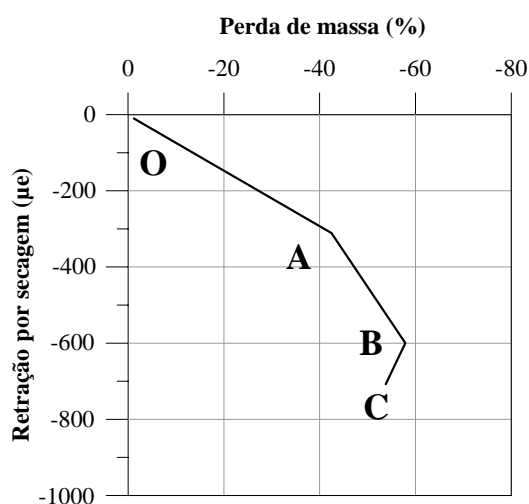


Figura 31 Representação esquemática do gráfico de retração *versus* perda de massa

O ensaio de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica foi determinado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Foram moldados três corpos de provas cilíndricos com dimensões de (50 x 100) mm, que posteriormente foram ensaiados aos 7 e 28 dias de idade.

Para avaliar a absorção de água por capilaridade seguiu-se as prescrições da NBR 15259 (ABNT, 2005). Foram moldados três corpos de prova prismáticos com dimensões de (40 x 40 x 160) mm. Após 24h as amostras foram desmoldadas e submetidas à cura ao ar com condições laboratoriais controladas até a idade de 28 dias. Para a realização do ensaio, foi feita a selagem dos corpos de prova com filme plástico, deixando uma altura livre de pelo menos 5 mm, que é a região que fica em contato com a lâmina d'água, como mostrado na Figura 32. Esse procedimento foi adotado a fim de evitar que as amostras absorvessem ou perdessem umidade para o ambiente.



Figura 32 Corpos de prova selados com filme plástico para a realização do ensaio de absorção por capilaridade

Vale salientar que além dos tempos de 10 e 90 minutos estabelecidos pela NBR 15259 (ABNT, 2005) adotada para a execução do ensaio, também foram realizadas leituras com 3h, 6h, 24h, 48h, 72h, seguindo com leituras a cada 24h até a saturação dos corpos de prova. Para a verificação da taxa de absorção utilizou-se a metodologia proposta por Kelham (1988), que estabelece uma relação entre o ganho de massa e a raiz quadrada do tempo, esses dados foram plotados em um gráfico que é composto por duas retas que representam a absorção inicial e a saturação das amostras. O ponto de intercessão entre as duas retas é denominado *nick point* e equivale ao início da saturação como indicado na Figura 33. A taxa de absorção é calculada pela relação entre a inclinação da reta de absorção inicial e a área da seção transversal das amostras.

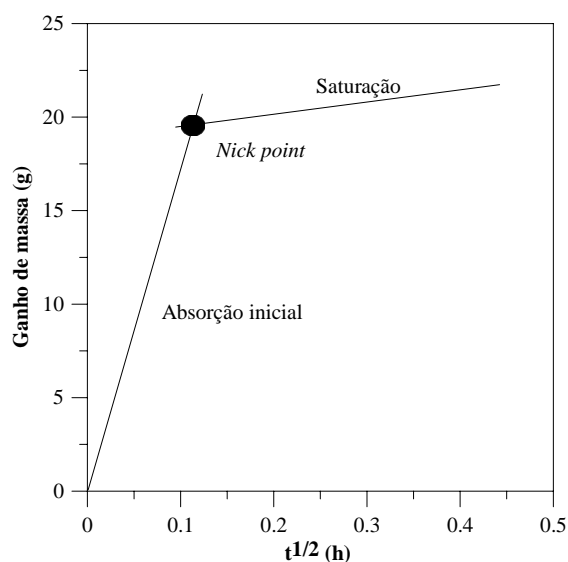


Figura 33 Esquema do gráfico gerado pelo ensaio de absorção por capilaridade, adaptado de KELHAM (1988)

O ensaio de permeabilidade de água pelo método do cachimbo não é normatizado no Brasil. Os procedimentos para esse experimento são especificados pela *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les constructions* (RILEM) e pelo *Centre Scientifique et Technique de la Construction* (CSTC). O método recomenda que seja utilizado um instrumento graduado, denominado cachimbo (Figura 34), que é colado a uma superfície vertical (revestimento de argamassa), e é adicionado água até o nível 0 (zero). O ensaio tem duração de 15 minutos, sendo feita uma leitura a cada minuto e a diminuição na altura da coluna de água indica a permeabilidade à água da argamassa. Essa etapa experimental foi realizada nas argamassas aplicadas como revestimento em substratos de blocos cerâmicos (ver características dos blocos no item 3.2.5), aos 49 dias de idade, e para cada mistura foram ensaiados 2 cachimbos, conforme mostrado na Figura 34.



Figura 34 Ensaio de permeabilidade pelo método do Cachimbo: a) Instrumento utilizado para a realização do ensaio; b) Cachimbos fixados na superfície da amostra

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos com a realização do programa experimental proposto foram avaliados estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA), com comparação múltipla de médias para tal, foi utilizado o teste de Tukey. O nível de significância utilizado nas análises de foi de 5 %, ou seja, quando o p-valor apresentou valores inferiores a 0,05 ($p < 0,05$). Esses procedimentos foram realizados utilizando como instrumento o software *Statistica*®.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados das propriedades avaliadas durante a realização do programa experimental deste trabalho, bem como, a sua análise estatística.

4.1 PROPRIEDADES AVALIADAS NO ESTADO FRESCO

4.1.1 Consistência

4.1.1.1 Comparativo entre o método da NBR 16541 e o método da NBR 7215

O ensaio de consistência foi aplicado para a dosagem experimental das argamassas e também como parâmetro de avaliação do método de mistura especificado pela NBR 16541 (ABNT, 2016). Para tal, estabeleceu-se um comparativo entre os métodos de mistura prescritos na NBR 7215 (ABNT, 2019) e na NBR 16541 (ANBT, 2016), a fim de verificar o comportamento de um método de mistura que faz a adição de água em apenas uma etapa e mistura os materiais anidros à água, NBR 7215 (ABNT, 2019), em comparação a um método que adiciona a água em duas etapas e mistura a fase líquida aos materiais anidros, NBR 16541 (ABNT, 2016).

Durante essa etapa experimental também foi possível analisar as argamassas qualitativamente, quanto à coesão, e também quantitativamente, por meio das medidas de espalhamento obtidas no ensaio de consistência, conforme apresentado na Tabela 18. Os resultados individuais para cada repetição do ensaio estão apresentados no Apêndice A, na Tabela 34.

Tabela 18 Índice de consistência médio para as misturas avaliadas nesse estudo

Mistura	NBR 7215 (ABNT, 2019)		NBR 16541 (ABNT, 2016)	
	C (mm)	a/c	C (mm)	a/c
REF	258	0,68	262	0,68
15%SC	228	0,68	231	0,68
30%SC	209	0,68	214	0,68
15%CC	262	0,72	259	0,72
30%CC	257	0,77	261	0,76

Nota: C - Índice de consistência; a/c - Relação água/cimento.

É possível perceber que para ambas as metodologias utilizadas, 7215 (ABNT, 2019) e 16541 (ABNT, 2016), houve redução no espalhamento das argamassas sem correção da relação a/c (misturas SC). É importante salientar que a perda de espalhamento ocorreu a

percentuais equivalentes, independente do método de mistura avaliado, como indicado na Figura 35.

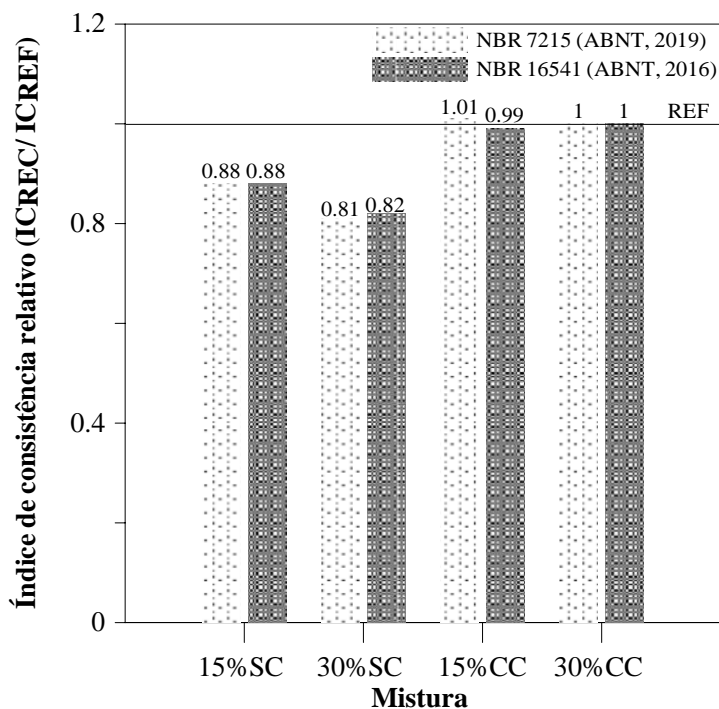


Figura 35 Relação a/c efetiva para as argamassas avaliadas

Ao comparar as duas metodologias percebe-se que, de forma geral, as argamassas apresentaram espalhamentos semelhantes, apesar da diferença na sequência de adição de materiais e no processo de incorporação de água na mistura, o que também pode ser observado qualitativamente no aspecto das misturas apresentados nas imagens da Figura 36 e da Figura 37, para as argamassas SC e CC, respectivamente. No entanto, para a mistura 30%CC, os traços produzidos conforme as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 2019) necessitaram de um pouco mais de água para atingir a trabalhabilidade especificada (260 ± 5 mm), como observado na Tabela 18. Ao utilizar a mesma relação a/c adotada para a mistura produzida com o método da NBR 16541 (ABNT, 2016), ou seja, $a/c=0,76$, o espalhamento obtido foi de 253 mm, que estava fora dos limites adotados para as argamassas desse estudo (260 ± 5 mm), e a relação a/c foi aumentada para 0,77. Esse comportamento pode ser justificado em função dessa mistura (30%CC) apresentar maiores teores de finos dentre as amostras analisadas, e o método de mistura com a adição de água em apenas uma etapa (NBR 7215) não favoreceu a molhabilidade desses materiais, e conseqüentemente, reduziu a fluidez da mistura quando a relação a/c foi mantida constante.

Antunes, John e Pileggi (2009) e França (2013) ao comparar metodologias com adição de água em mais de uma etapa e em uma única fração verificaram que a primeira possibilita um melhor desempenho para as argamassas no que diz respeito à fluidez. Contudo, nota-se que a metodologia utilizada nesse estudo não apresentou esse comportamento, com exceção da mistura 30%CC.

Com base nos resultados discutidos nesse tópico, percebe-se que, de forma geral, os métodos de mistura apresentaram influência semelhante no comportamento das argamassas quanto aos resultados do ensaio de consistência. Contudo, pode haver alguma diferença quando se utiliza maiores percentuais de AR, o que ainda deve ser investigado. Assim, para o presente estudo, como não houve grandes alterações na consistência das argamassas em função do método de mistura utilizado, as demais propriedades, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, foram avaliadas nas argamassas produzidas apenas com o método de mistura prescrito pela NBR 16541 (ABNT, 2016).

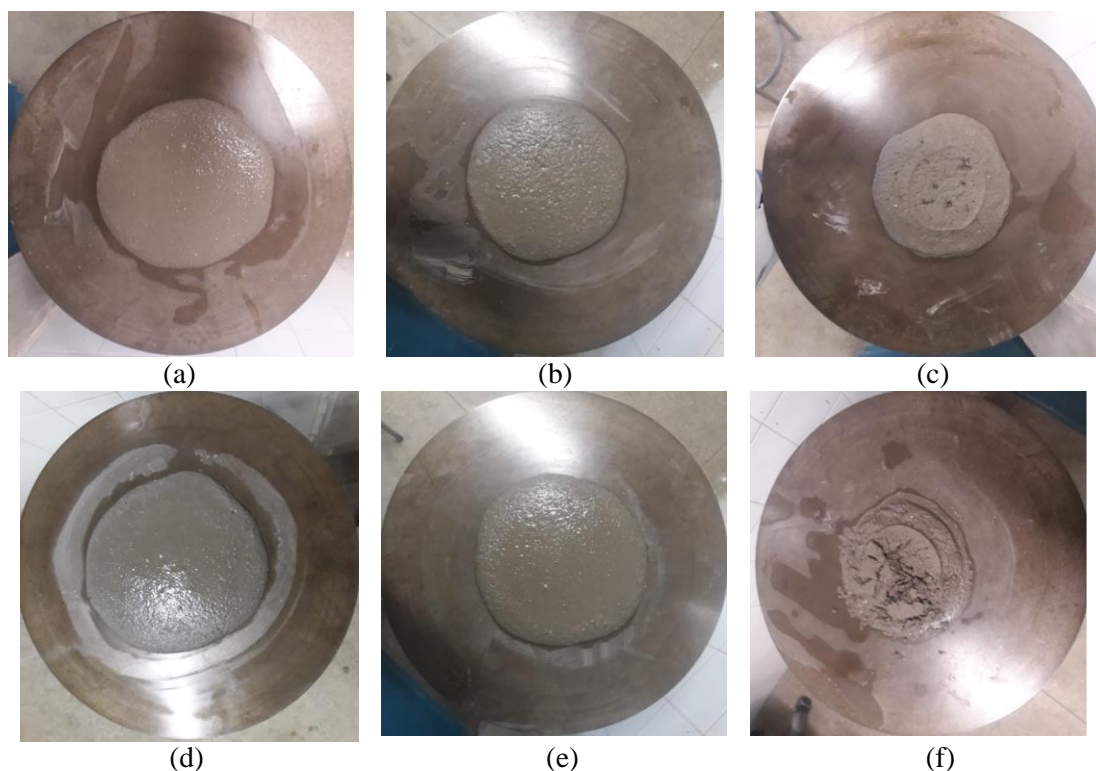


Figura 36 Aspecto das argamassas no ensaio de consistência para as misturas sem compensação da relação a/c (SC): a) REF 7215 (ABNT, 2019); b) 15 % 7215 (ABNT, 2019); c) 30 % 7215 (ABNT, 2019); d) REF 16541 (ABNT, 2016); e) 15 % 16541 (ABNT, 2016); f) 30 % 16541 (ABNT, 2016)

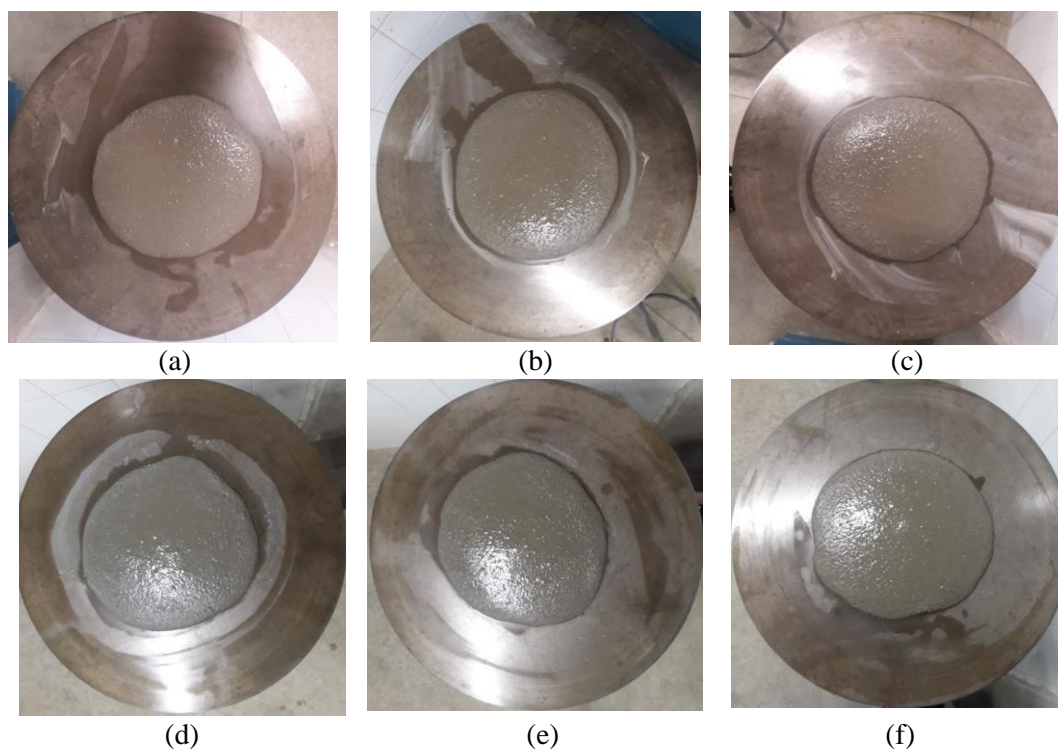


Figura 37 Aspecto das argamassas no ensaio de consistência para as misturas com compensação da relação a/c (CC): a) REF 7215 (ABNT,2019); b) 15 % 7215 (ABNT, 2019); c) 30 % 7215 (ABNT, 2019); d) REF 16541 (ABNT, 2016); e) 15 % 16541 (ABNT, 2016); f) 30 % 16541 (ABNT, 2016)

4.1.1.2 Avaliação do uso do AR no ensaio de consistência usando o método de mistura da NBR 16541

Após a análise comparativa entre os métodos de mistura, foi realizada uma análise do comportamento das argamassas em função do teor de AR, quando se utiliza a sequência da NBR 16541 (ABNT, 2016).

Observou-se que as argamassas com AR apresentaram maiores consumos de água para alcançar o espalhamento de 260 ± 5 mm quando comparadas à mistura de referência. À medida que se aumentou a proporção de AR, maior também foi a demanda de água para manter a trabalhabilidade dentro da faixa especificada. Esses resultados estão em consonância com o que foi verificado por Cuenca-Moyano *et al.* (2020), Ferreira *et al.* (2019a) e Jiménez *et al.* (2013) e são justificados pelo maior potencial de absorção, textura mais rugosa e também pelo formato mais angular que geralmente são identificados para os grãos de AR. Os fatores supracitados fazem com que seja necessário um maior teor de pasta para envolver os grãos e diminuir o efeito de travamento nas argamassas recicladas.

Vale salientar que, como citado por Jesus *et al.* (2019) e Braga, Brito e Veiga (2012), em alguns casos o maior percentual de finos promove um efeito fíler, ocupando vazios que antes eram preenchidos por água e, assim, há a redução da relação a/c necessária para manter a trabalhabilidade da mistura. O comportamento das argamassas do presente estudo não seguiu essa tendência, visto que, possivelmente as características citadas no parágrafo anterior sobrepujaram o efeito do preenchimento.

Quanto aos traços sem correção da relação a/c, houve redução do espalhamento de 12 % e 18 % para as misturas 15%SC e 30%SC, respectivamente, em relação à argamassa de referência. A Figura 36 (f) mostra que o traço 30%SC apresentou um aspecto mais seco, chegando a perder a coesão, diferentemente da mistura 15%SC (Figura 36e).

Devido a menor trabalhabilidade, é possível que as misturas 15%SC e 30%SC apresentem uma menor aderência às ranhuras dos substratos, reduzindo a sua performance durante a aplicação e uso. Contudo, na literatura são encontrados trabalhos que admitem consistências inferiores à adotada neste estudo, como é o caso de Neno, Brito e Veiga (2014) que avaliaram argamassas recicladas de revestimento e definiram uma consistência de trabalho de 175 ± 10 mm. Cuenca-Moyano *et al.* (2020) consideraram uma consistência de (140 – 200) mm, pois dentro dessa faixa as argamassas são classificadas como plásticas, segundo a EN-1015-3. Já Ledesma *et al.* (2014) utilizaram como parâmetro a UNE-EN 1015-3:1999 e consideraram uma consistência de 175 ± 10 mm.

Tanto o aumento da relação a/c das argamassas recicladas para manter a trabalhabilidade das misturas (15%CC e 30%CC) dentro da mesma faixa especificada para a mistura REF, quanto a redução da consistência das argamassas sem correção do a/c (15%SC e 30%SC) em comparação à mistura REF, indicam ser necessária uma análise do comportamento dessas argamassas no que tange as demais propriedades, a fim de verificar se o aumento da quantidade de água de mistura ou a perda de consistência foram elevados o suficiente para gerar grandes alterações no comportamento mecânico e índices físicos das argamassas.

4.1.2 Retenção de água

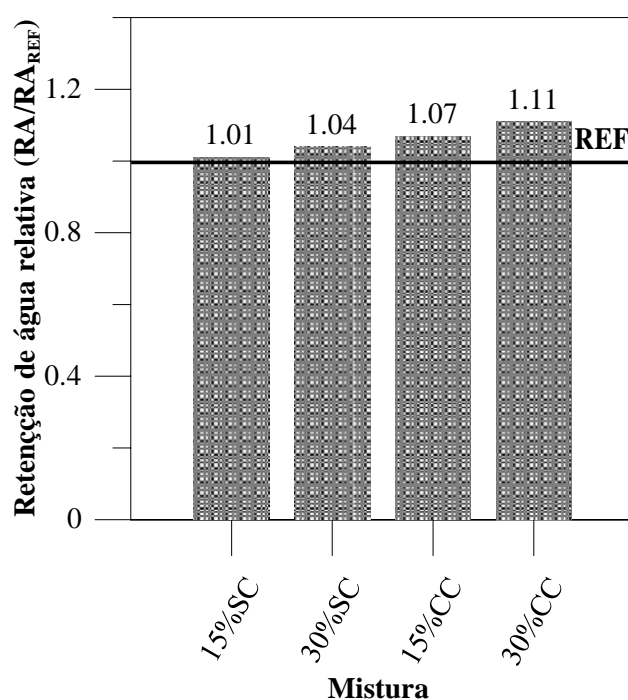
Os valores médios obtidos no ensaio de retenção de água estão mostrados na Tabela 19 (ver valores individuais no Apêndice A, Tabela 35).

Tabela 19 Resultados médios de retenção de água das misturas estudadas

Mistura	Retenção de água \pm SD (CV)
	% \pm % (%)
REF	73 \pm 1 (1,3)
15%SC	74 \pm 0 (0,6)
30%SC	76 \pm 0 (0,1)
15%CC	78 \pm 0 (0,2)
30%CC	81 \pm 0 (0,1)

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

É perceptível que os melhores resultados para essa propriedade foram obtidos para os traços 15%CC e 30%CC com aumento de 7 % e 11 % (Figura 38), respectivamente, na retenção de água das argamassas recicladas em relação à mistura de referência.

**Figura 38** Retenção de água relativa para as argamassas estudadas

Para verificar a influência do teor de AR na retenção de água foi realizada a Análise de Variância (ANOVA), cujos resultados estão mostrados na Tabela 20. Conforme verificado, a utilização do AR influencia significativamente a retenção de água.

Tabela 20 Resultados da ANOVA para o ensaio de retenção de água

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	P	Significância
A – Teor de AR	1	40,50	162,00	0,000220	S
B – Correção da relação a/c	1	12,50	50,00	0,002111	S
AB	1	2,00	8,00	0,047421	S
Erro	4	0,25	0,25		

Nota: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrada; P – valor p do teste; S – significativo.

O teste de Tukey, realizado para comparação múltipla entre as médias, está apresentado no Apêndice B (Tabela 43). É possível perceber que houve diferença significativa entre as misturas, quando comparadas à argamassa de referência, com exceção da amostra 15%SC, que apresentou comportamento semelhante (Figura 39a). Com base nesses resultados é possível afirmar que ao utilizar baixos teores de AR com a mesma relação a/c da argamassa de referência (misturas SC), não há influência para a retenção de água. Quanto às demais misturas, o aumento na retenção pode ser atribuído à maior superfície específica dos grãos de AR e também à sua maior porosidade. É importante lembrar que as misturas 15%CC e 30%CC apresentaram um teor de água ligeiramente maior que a mistura REF, o que pode ter contribuído para esse resultado (Figura 39b).

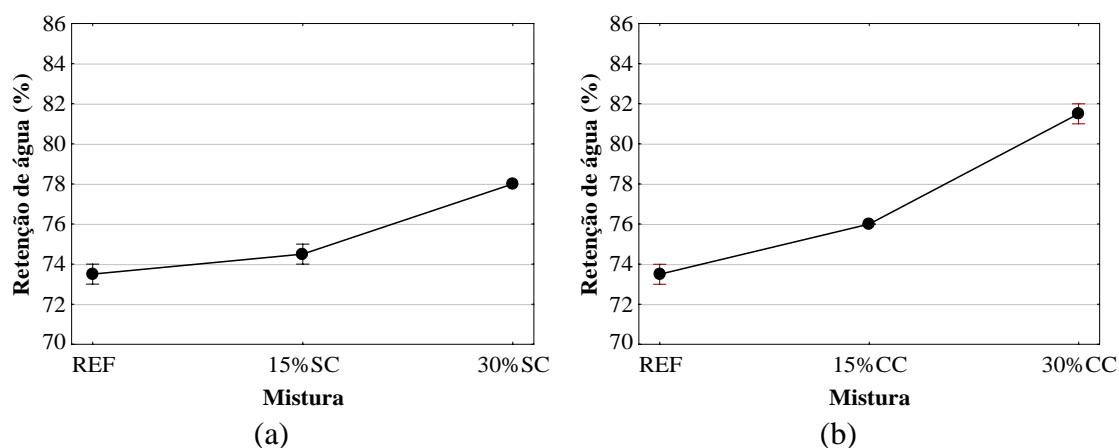


Figura 39 Resultados médios para o ensaio de retenção de água para as diferentes misturas: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c - CC

Ferreira *et al.* (2019a) e Silva, Brito e Dhir (2016) apontam que os finos presentes no AR podem atuar como retentores de água em função da sua superfície específica mais elevada e, conseqüentemente, maior adsorção. Vale salientar que a maior porosidade dos grãos também pode ter influenciado na obtenção desse resultado, pois Silva, Brito e Dhir (2016) também apontam que há a possibilidade desse tipo de agregado reter uma maior quantidade de água nos poros superficiais.

O bom desempenho para essa propriedade é importante, pois quanto maior a retenção de água, melhor tende a ser o processo de hidratação do cimento, proporcionando à argamassa um melhor potencial de adesão no estado fresco e uma maior resistência mecânica no estado endurecido (SILVA; BRITO; DHIR, 2016).

4.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados médios obtidos para a densidade de massa e teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela 21. Os valores individuais para cada repetição do ensaio são mostrados no Apêndice A, na Tabela 36.

Tabela 21 Resultados médios de densidade de massa e teor de ar incorporado das misturas estudadas

Mistura	Densidade de massa \pm SD (CV) kg/m ³ \pm kg/m ³ (%)	Teor de ar incorporado \pm SD (CV) % \pm % (%)
REF	2105 \pm 6 (0,3)	5,9 \pm 0,3 (4,8)
15%SC	2064 \pm 0 (0,0)	7,5 \pm 0,0 (0,2)
30%SC	2029 \pm 4 (0,2)	8,9 \pm 0,2 (2,0)
15%CC	2067 \pm 3 (0,1)	6,6 \pm 0,1 (2,0)
30%CC	2040 \pm 2 (0,1)	6,9 \pm 0,1 (1,4)

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

A densidade de massa para todas as argamassas sofreu um decréscimo em relação à mistura de referência. Esse resultado é positivo, pois a redução da massa específica facilita o processo de aplicação das argamassas no estado fresco. Quanto ao teor de ar incorporado, todas as misturas avaliadas apresentaram um incremento quando comparadas à mistura REF. É possível verificar os comportamentos citados na Figura 40.

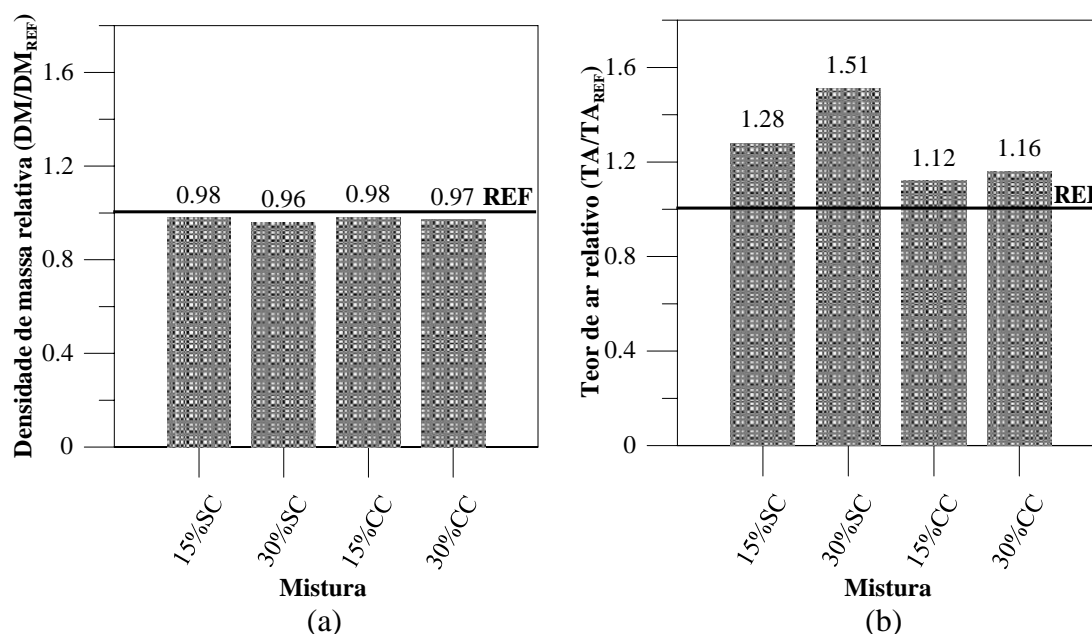


Figura 40 Resultados relativos para os ensaios de: a) densidade de massa; b) teor de ar incorporado

A menor densidade de massa para as argamassas recicladas pode ser resultado da menor massa específica que o AR apresenta. Cuenca-Moyano *et al.* (2020) e Jesus *et al.* (2019)

observaram um desempenho semelhante para as argamassas recicladas do seu estudo e atribuíram ao resultado a mesma explicação.

É perceptível que o teor de ar incorporado sofreu influência da adição do AR, contudo, esse efeito foi secundário, pois foi influenciado mais diretamente pela maior quantidade de água total na mistura para a formação de pasta e, conseqüentemente, preenchimento dos vazios. Percebe-se esse comportamento ao verificar que as argamassas mais secas, ou seja, sem correção da relação a/c (15%SC e 30%SC), foram as que apresentaram o maior teor de ar quando comparadas às argamassas de referência (Figura 40).

Os resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado sofreram influência significativa do Teor de AR, conforme demonstrado pela ANOVA, apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 Resultados da ANOVA para a densidade de massa e teor de ar incorporado

Densidade de massa					
Fator	GDL	MQ	F _{cal}	P	Significância
A – Teor de AR	1	1985	227	0,000113	S
B – Correção da relação a/c	1	1985	11	0,028658	S
AB	1	25	3	0,169579	NS
Erro	4	9			
Teor de ar incorporado					
Fator	GDL	MQ	F _{cal}	P	Significância
A – Teor de AR	1	1,4280	98,15	0,000583	S
B – Correção da relação a/c	1	4,4701	307,22	0,000062	S
AB	1	0,5941	40,83	0,003079	S
Erro	4	0,0146			

Nota: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrada; P – valor p do teste; S – significativo; NS – não significativo.

Com o auxílio do teste de Tukey mostrado no Apêndice B, na Tabela 44 e na Tabela 45, foi identificado que todas as argamassas recicladas apresentaram diferença significativa tanto para densidade de massa quanto para o teor de ar incorporado, quando comparadas à mistura REF. A redução da densidade de massa pode ser atribuída ao fato do resíduo apresentar menor massa específica que o AN. Quanto ao teor de ar incorporado, compreende-se que o uso de 15 e 30 % de AR na produção dessas argamassas é suficiente para alterar o comportamento dessa propriedade.

Quando se relaciona as duas propriedades analisadas nesse tópico percebe-se que o teor de ar incorporado possui uma relação inversamente proporcional à densidade de massa, e esse fator também pode ter contribuído para a redução da densidade de massa das

argamassas no estado fresco. Os gráficos da Figura 41 e da Figura 42 ilustram esse comportamento.

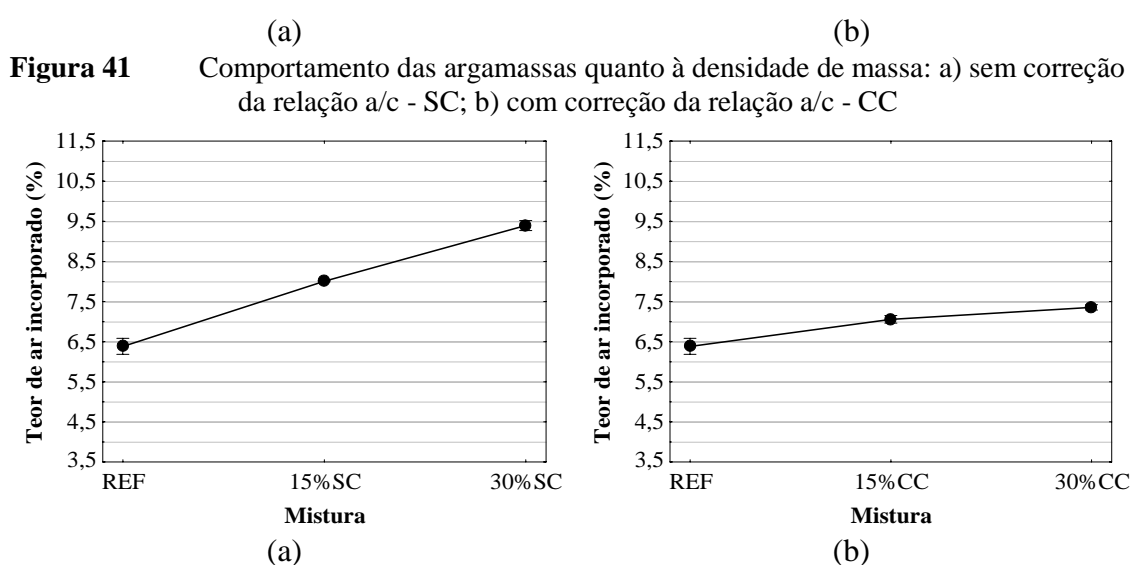


Figura 42 Comportamento das argamassas quanto ao teor de ar incorporado: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c - CC

Quanto menor a densidade de massa, a argamassa se torna mais leve e mais fácil de ser transportada e aplicada pelo profissional, porém, é importante se atentar para esse fator, pois as misturas menos densas, de forma geral, tendem a ser mais porosas no estado endurecido, em função do maior teor de ar aprisionado. Essa condição torna as argamassas mais suscetíveis ao ataque de agentes externos e, também, no estado endurecido pode promover uma redução da resistência mecânica (LEDESMA *et al.*, 2014; JIMÉNEZ *et al.*, 2013).

4.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica

Os resultados médios referentes de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica real estão representados na Tabela 23 e os valores individuais verificados para cada amostra estão descritos no Apêndice A (Tabela 39).

Tabela 23 Resultados de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real das argamassas estudadas

Mistura	A \pm Sd (CV) % \pm % (%)	IV \pm Sd (CV) % \pm % (%)	ME \pm Sd (CV) g/cm ³ \pm g/cm ³ (%)
REF	10,98 \pm 0,31 (2,8)	24,30 \pm 0,35 (1,4)	2,60 \pm 0,06 (2,3)
15%SC	11,60 \pm 0,08 (0,7)	25,33 \pm 0,16 (0,6)	2,58 \pm 0,00 (0,0)
30%SC	11,80 \pm 0,20 (1,7)	25,62 \pm 0,34 (1,3)	2,57 \pm 0,00 (0,0)
15%CC	13,63 \pm 0,24 (1,8)	26,00 \pm 0,38 (1,5)	2,58 \pm 0,01 (0,4)
30%CC	14,74 \pm 0,33 (2,2)	27,55 \pm 0,55 (2,0)	2,57 \pm 0,02 (0,8)

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; A – absorção por imersão; IV – índice de vazios; ME – massa específica real.

A incorporação do AR às misturas promoveu maiores potenciais de absorção e também um maior índice de vazios em comparação à argamassa de referência. Na Figura 43a é possível verificar por meio da absorção relativa que há um incremento de 6 %, 7 %, 24 % e 34 % na absorção de água para as misturas 15%SC, 30%SC, 15%CC e 30%CC, respectivamente, em comparação à mistura REF. Comportamento semelhante foi observado para o índice de vazios (Figura 43b), em que todas as misturas apresentaram incremento dos valores observados, 4 %, 5 %, 7 % e 13 %, para os traços 15%SC, 30%SC, 15%CC e 30%CC, respectivamente, quando comparados a argamassa REF.

Percebe-se que quanto maior o percentual de AR e também maior a relação a/c empregada na produção da mistura, mais expressivo o acréscimo da absorção de água e índice de vazios para as misturas com compensação da relação a/c. Dessa forma, há um indicativo de que as variáveis supracitadas promoveram o incremento da porosidade aberta para as argamassas recicladas.

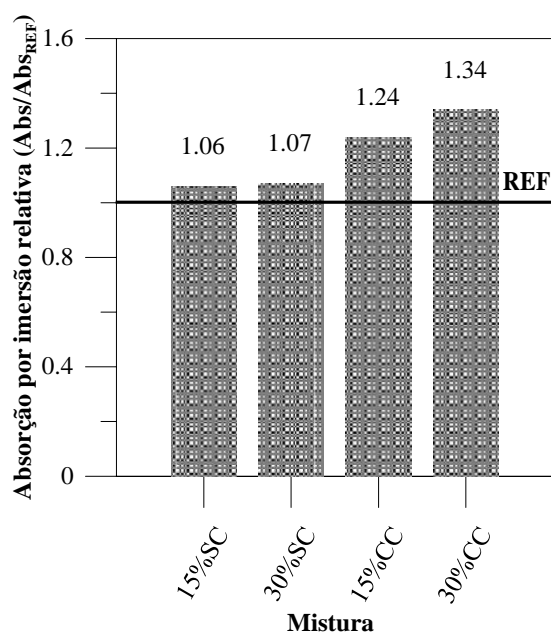


Figura 43 Resultados relativos para os índices físicos das argamassas recicladas: a) absorção por imersão; b) índice de vazios

A literatura indica que as taxas de absorção de água por imersão aumentam e a massa específica diminui com a incorporação e aumento do percentual de AR. Resultados semelhantes foram obtidos por Andrade *et al.* (2018) e Ferreira *et al.* (2019a), que assinalam que a maior capacidade de absorção do AR pode influenciar diretamente nessas propriedades. Para o presente estudo, durante a fase de caracterização dos agregados, observou-se uma taxa de absorção bem superior para o AR quando comparado ao AN (86 vezes maior). Essa condição pode ter influenciado no incremento do potencial de absorção.

Para verificar a influência da utilização do AR nas misturas, os resultados foram avaliados por meio da ANOVA mostrada na Tabela 24 e pelo teste de Tukey, para comparação múltipla entre as médias, que consta no Apêndice B (Tabela 46 e Tabela 47). Percebe-se que o teor de AR oferece influência significativa sobre a absorção de água por imersão e índice de vazios das argamassas estudadas. Para a massa específica real esse fator não exerce influência sobre os resultados.

Tabela 24 Resultados da ANOVA para a absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real

ABSORÇÃO POR IMERSÃO					
Fator	GDL	MQ	F _{CAL}	P	SIGNIFICÂNCIA
A – Teor de AR	1	1,449	33,88	0,000396	S
B – Correção da relação a/c	1	19,076	446,06	0,000000	S
AB	1	0,735	17,19	0,003227	S
Erro	8	0,043			
ÍNDICE DE VAZIOS					
Fator	GDL	MQ	F _{CAL}	P	SIGNIFICÂNCIA
A – Teor de AR	1	2,503	17,09	0,003280	S
B – Correção da relação a/c	1	5,070	34,36	0,000368	S
AB	1	1,178	8,05	0,021928	S
Erro	8	0,146			
MASSA ESPECÍFICA REAL					
Fator	GDL	MQ	F _{CAL}	P	SIGNIFICÂNCIA
A – Teor de AR	1	0,00053	3,00	0,119001	NS
B – Correção da relação a/c	1	0,00013	0,80	0,408168	NS
AB	1	0,00000	0,00	1,000000	NS
Erro	8	0,00018			

Nota: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrada; NS – Não significativo; P – valor do P teste; S – significativo; NS – não significativo.

O teste de Tukey aponta que apenas as argamassas 15%SC não apresentaram diferença significativa entre as médias de absorção por imersão quando comparadas as argamassas de referência. Quanto as demais misturas (30%SC, 15%CC e 30%CC), verifica-se que houve diferença significativa entre suas médias quando comparadas a argamassa de referência. Observou-se que, assim como, o percentual de AR, a relação a/c também tem influência no comportamento dessa propriedade. Desempenho semelhante foi observado na análise do índice de vazios. Os gráficos da Figura 44 e da Figura 45 apontam os comportamentos citados.

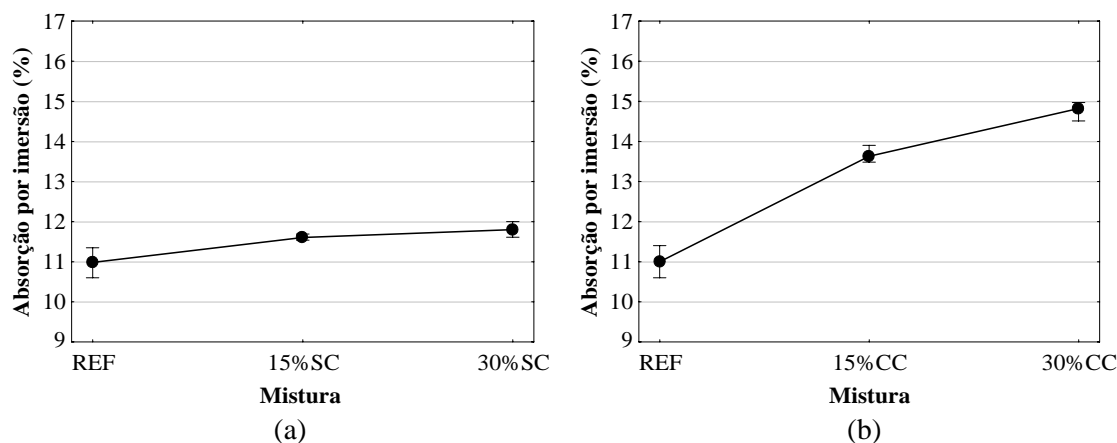


Figura 44 Influência do tipo de mistura na absorção de água por imersão: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c - CC

Figura 45 (a) (b)
Influência do tipo de mistura no índice de vazios das argamassas: a) sem correção da relação a/c - SC; b) com correção da relação a/c - CC

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção por imersão e índice de vazios corroboram o comportamento obtido para as argamassas recicladas durante o ensaio de teor de ar incorporado, visto que as misturas recicladas também apresentaram maior percentual de ar aprisionado no estado fresco, quando comparadas as argamassas de referência. Contudo, no estado endurecido, as misturas com correção (CC) da relação a/c apresentaram maior índice de vazios que as misturas sem correção (SC) do a/c. Tal fato está relacionado com a maior relação a/c e menor consumo de cimento das misturas CC, como pode ser visto nos dados da Tabela 18, o que promove um aumento da porosidade no estado endurecido.

4.2.2 Resistência à compressão

A Tabela 25 mostra os resultados médios do ensaio de resistência mecânica à compressão, aos 7 e 28 dias, obtidos nesse estudo. Os valores individuais para cada amostra estão apresentados no Apêndice A, Tabela 37.

Tabela 25 Resultados médios do ensaio de resistência à compressão para as argamassas avaliadas

Mistura	fc7 ± SD (CV) MPa ± MPa (%)	fc28 ± SD (CV) MPa ± MPa (%)
REF	14,3 ± 0,3 (1,9)	17,1 ± 0,3 (2,0)
15%SC	15,0 ± 0,2 (1,5)	18,8 ± 0,2 (1,0)
30%SC	15,4 ± 0,3 (1,7)	19,4 ± 0,3 (1,4)
15%CC	13,3 ± 0,4 (2,7)	15,0 ± 0,2 (1,2)
30%CC	13,4 ± 0,4 (2,7)	15,6 ± 0,3 (2,1)

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; fc7 – resistência à compressão, aos 7 dias; fc28 – resistência à compressão, aos 28 dias.

As médias obtidas para o ensaio de compressão mostram um decréscimo na resistência quando se utiliza o AR na sua composição para as misturas com correção da relação a/c (15%CC e 30%CC), o que era esperado em função da maior quantidade de água

adicionada à mistura para manter a trabalhabilidade. Aos 28 dias, identificou-se um decréscimo de 12 % e de 8 % para as misturas 15%CC e 30%CC, respectivamente, em relação à argamassa de referência (Figura 46). Também é importante citar que os resultados do ensaio de teor de ar incorporado, absorção por imersão e índice de vazios foram superiores para esses traços, o que pode resultar em uma redução da resistência à compressão, como observado. As amostras avaliadas por Ledesma *et al.* (2015) e Zhao *et al.* (2015) tiveram comportamentos semelhantes aos resultados obtidos nesse estudo.

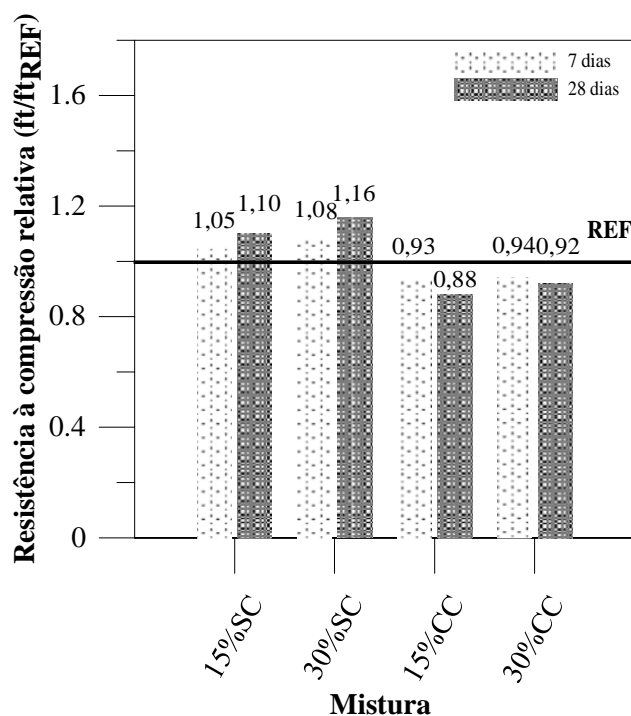


Figura 46 Resistência à compressão relativa para as argamassas avaliadas

Já as misturas 15%SC e 30%SC foram as que apresentaram os maiores resultados de f_c entre as amostras avaliadas, chegando a um incremento de 10 % e 18 % na resistência à compressão aos 28 dias, respectivamente, quando comparadas à mistura de referência. Segundo Silva *et al.* (2016), o acréscimo na resistência se dá em função da maior absorção de água do grão de AR, que reduz a relação a/c efetiva da mistura. Com esse processo há o transporte de grãos de cimento para o interior dos poros das partículas, o que aumenta a aderência entre a pasta e o agregado, aumentando a resistência à compressão. Dessa forma, mesmo que as argamassas recicladas sem correção da relação a/c (15%SC e 30%SC) apresentem maior teor de ar incorporado no estado fresco dentre todas as misturas, a menor relação a/c efetiva sobrepõe esse efeito. Além disso, essas misturas podem ter sofrido um efeito benéfico do maior teor de finos do AR, que auxiliou no preenchimento dos espaços vazios.

Todos os resultados para o ensaio de resistência à compressão foram analisados estatisticamente por meio da ANOVA (Tabela 26) e do teste de Tukey (Apêndice B, Tabela 48 e Tabela 49).

Tabela 26 Resultados da ANOVA para o ensaio de resistência à compressão quando avaliado o teor de substituição, a idade e a correção da relação a/c

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	P	Significância
A – Teor de AR	1	1,862	21,50	0,000105	S
B – Correção da relação a/c	1	67,396	778,02	0,000000	S
C – Idade	1	71,342	823,57	0,000000	S
AB	1	0,115	1,33	0,260185	NS
AC	1	0,567	6,55	0,017238	S
BC	1	9,267	106,97	0,000000	S
ABC	1	0,000	0,00	0,971551	NS
Erro	30	0,089			

Nota: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrada; P – valor do P teste; S – significativo; NS – não significativo.

Observa-se na Tabela 26 que os fatores teor de AR e idade, assim como a interação entre os dois fatores influenciaram significativamente os resultados de resistência à compressão das argamassas estudadas. O teste de Tukey, realizado para comparação múltipla entre as médias, mostrou que aos 7 dias todas as argamassas recicladas apresentaram diferença significativa em relação à mistura de referência. Contudo, quando são comparadas as amostras 15%SC e 30%SC, assim como, 15%CC e 30%CC, aos 7 dias, o teste de Tukey também indica que não houve diferença significativa entre essas amostras. Para as misturas aos 28 dias de idade, o teste de Tukey também mostrou que houve diferença significativa entre as misturas com AR e a REF, indicando que o uso desse tipo de material, mesmo que a baixos teores (15 % de substituição) a maiores idades é significativo. Também é perceptível que o fator idade também exerceu maior influência significativa para a resistência à compressão. Os comportamentos supracitados podem ser observados nos gráficos da Figura 47.

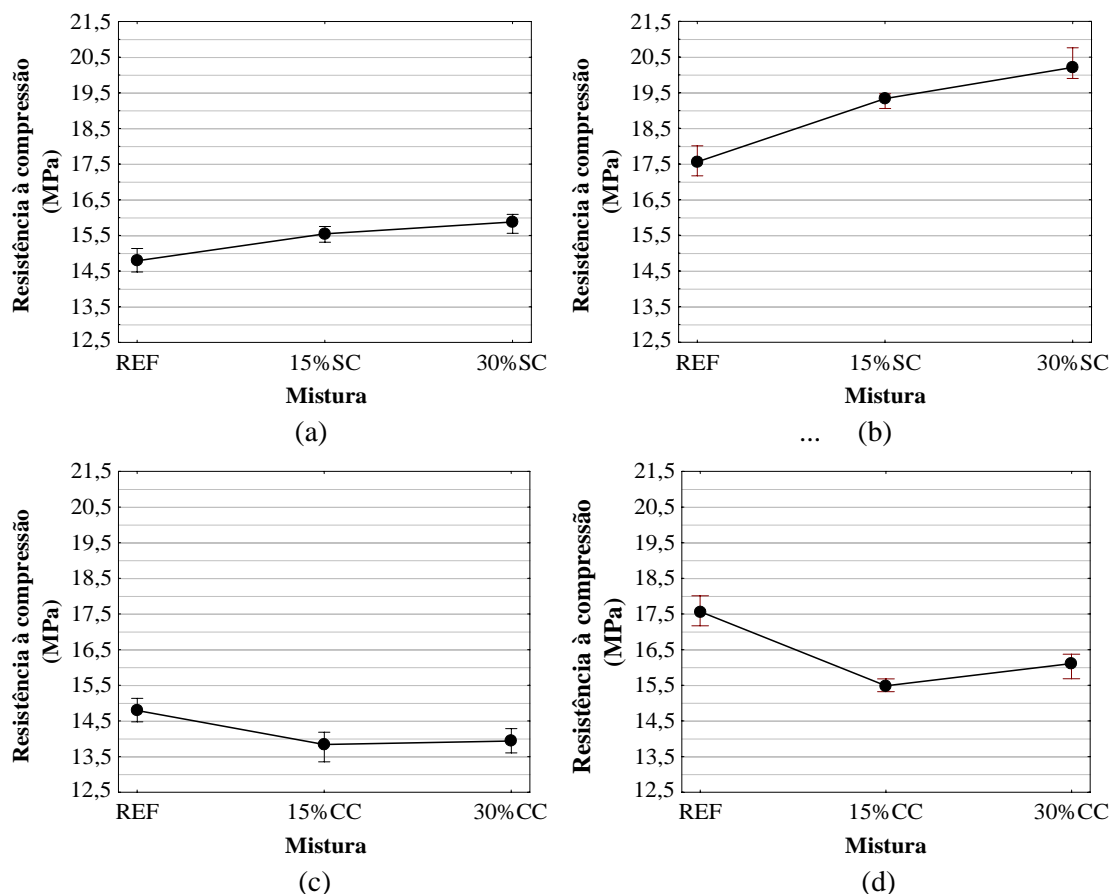


Figura 47 Influência do teor de AR sobre a resistência à compressão: a) misturas sem correção da relação a/c - 7 dias; b) misturas sem correção da relação a/c - 28 dias; c) misturas com correção da relação a/c - 7 dias; d) misturas com correção da relação a/c - 28 dias

Vale salientar que aos 28 dias quando comparadas as amostras 15%CC e 30%CC não houve diferença significativa entre as médias, o que pode indicar que até 30 % de incorporação do AR não há grandes alterações na resistência à compressão das argamassas, mesmo com a correção da relação a/c. Para as amostras supracitadas acredita-se que o efeito do maior travamento entre a fase pasta e a fase agregado e o efeito das partículas finas, nesse caso, por apresentar um maior teor, sobrepôs ao maior percentual de água na mistura, conseguindo manter um nível de resistência semelhante entre as argamassas 15%CC e 30%CC.

4.2.3 Resistência à tração na flexão

Os valores médios de resistência à tração para, 7 e 28 dias, estão apresentados na Tabela 27. Os dados individuais obtidos para cada amostra encontram-se no Apêndice A, Tabela 38.

Tabela 27 Resultados de resistência à tração das argamassas estudadas

Mistura	ft7 ± SD (CV) MPa ± MPa (%)	ft28 ± SD (CV) MPa ± MPa (%)
REF	4,1 ± 0,2 (4,5)	5,0 ± 0,1 (1,9)
15 % SC	5,0 ± 0,1 (2,0)	5,9 ± 0,2 (3,1)
30 % SC	5,2 ± 0,1 (1,9)	7,3 ± 0,2 (3,1)
15 % CC	3,7 ± 0,2 (4,3)	4,3 ± 0,1 (2,8)
30 % CC	4,4 ± 0,1 (3,2)	5,0 ± 0,0 (0,8)

Nota: SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; ft7 – resistência à tração, aos 7 dias; ft28 – resistência à tração, aos 28 dias.

A Figura 48 indica que as misturas 15%SC e 30%SC apresentaram as maiores resistências entre as argamassas avaliadas. Aos 28 dias os valores foram superiores a REF em 17 % e 45 %, respectivamente.

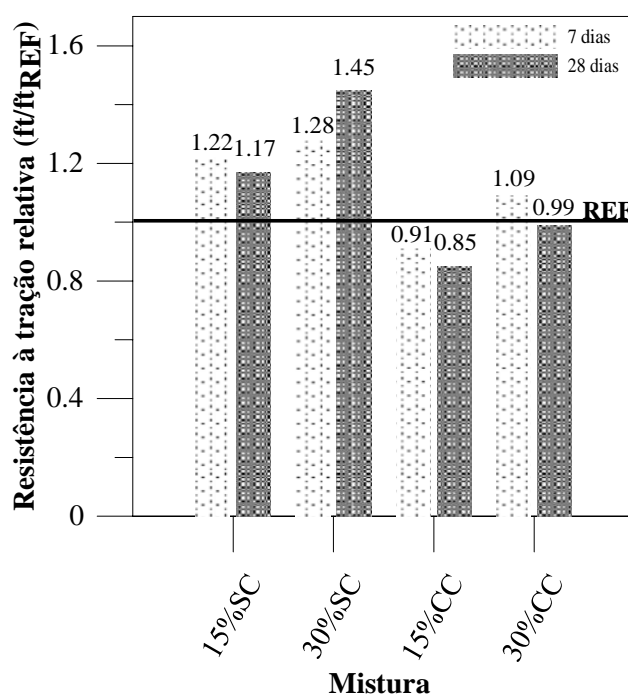


Figura 48 Resistência à tração na flexão relativa para as argamassas

Para as amostras 15%CC e 30%CC houve um decréscimo de 15 % e 1 % na resistência à tração aos 28 dias, respectivamente, em comparação com a mistura de referência. Ledesma *et al.* (2015) e Zhao *et al.* (2015) indicam em seus trabalhos que é possível que ocorra a redução da resistência mecânica, pois de modo geral, as argamassas com AR apresentam uma maior quantidade de água em sua composição, quando comparadas às argamassas convencionais para que obtenham a mesma consistência. Também é possível citar o maior índice de vazios e absorção por imersão apresentado por essas amostras, que pode influenciar diretamente nos resultados de resistências mecânicas.

Todas as amostras foram analisadas estatisticamente por meio da ANOVA (Tabela 28) e do teste de Tukey (Apêndice B, Tabela 50 e Tabela 51).

Tabela 28 Resultados da ANOVA para a resistência à tração na flexão quando avaliado o teor de substituição, a idade e a correção da relação a/c

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	P	Significância
A – Teor de AR	1	3,1896	171,48	0,000000	S
B – Correção da relação a/c	1	11,6033	623,84	0,000000	S
C – Idade	1	5,4765	294,44	0,000000	S
AB	1	0,0152	0,82	0,381743	NS
AC	1	0,4132	22,21	0,000333	S
BC	1	1,449	61,56	0,000002	S
ABC	1	0,4747	25,52	0,000177	S
Erro	14	0,0186			

Nota: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrada; P – valor do P teste; S – significativo; NS – não significativo.

Como mostrado na Tabela 28, o teor de AR, a idade, bem como, a interação entre idade e o teor de AR apresentaram influência significativa sobre os resultados de resistência à tração na flexão para as argamassas avaliadas, o que pode ser verificado nos gráficos da Figura 49.

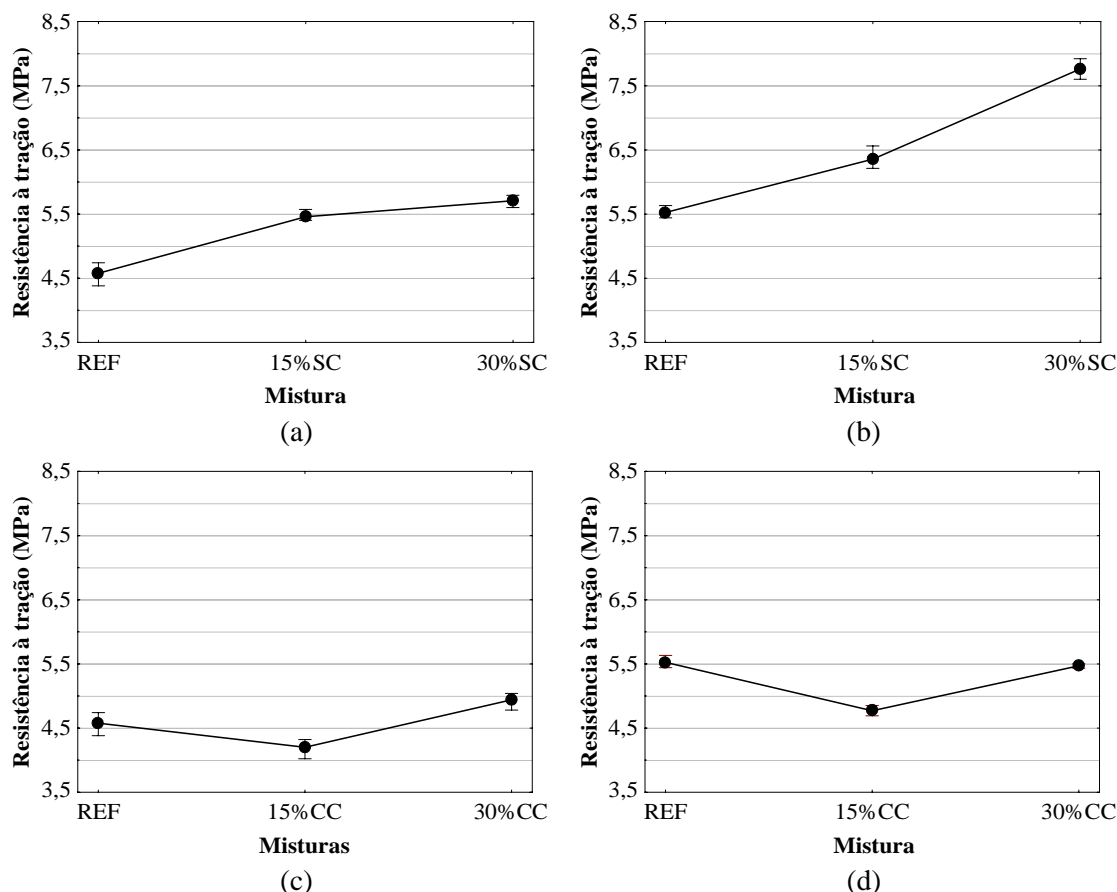


Figura 49 Influência do teor de AR para o ensaio de resistência à tração: a) misturas sem correção da relação a/c 7 dias; misturas sem correção da relação a/c 28 dias; c) misturas com correção da relação a/c 7 dias; misturas com correção da relação a/c 28 dias

O teste de Tukey permitiu concluir que há diferença significativa entre as argamassas recicladas e a de referência, com exceção da mistura 30%CC, aos 28 dias. O gráfico da Figura 49d também ilustra esse comportamento. Com base nas análises de resultados da literatura, a manutenção da resistência à flexão para o traço 30%CC, aos 28 dias, pode ser devido à maior aderência entre pasta e agregado, pela granulometria mais contínua do AR e também pela maior quantidade de finos do AR, que proporcionam uma maior compactação nessas misturas (ALVARENGA, 2018; BRAGA; BRITO; VEIGA, 2014).

4.2.4 Absorção por capilaridade

Os resultados médios da taxa de absorção média calculados por meio do método de Kelham (1988) e a absorção média para cada mistura obtida por meio da NBR 15259 (ABNT, 2005) estão apresentados na Tabela 29. Os resultados individuais dos ensaios de cada amostra estão apresentados no Apêndice A, Tabela 41.

Tabela 29 Resultados médios de absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas

Mistura	$A_{T10} \pm Sd$ (CV) g/cm ² \pm g/cm ² (%)	$A_{T90} \pm Sd$ (CV) g/cm ² \pm g/cm ² (%)	$C \pm Sd$ (CV) (g/h ^{1/2})*cm ² \pm (g/h ^{1/2})*cm ² (%)
REF	0,189 \pm 0,001 (0,4)	0,470 \pm 0,008(1,8)	0,224 \pm 0,00 (0,0)
15%SC	0,179 \pm 0,008 (4,2)	0,469 \pm 0,018 (3,8)	0,219 \pm 0,01 (4,6)
30%SC	0,170 \pm 0,002 (1,3)	0,449 \pm 0,010 (2,1)	0,204 \pm 0,01 (4,9)
15%CC	0,216 \pm 0,004 (2,0)	0,484 \pm 0,006 (1,2)	0,241 \pm 0,01 (4,1)
30%CC	0,232 \pm 0,008 (3,5)	0,535 \pm 0,019 (3,6)	0,257 \pm 0,00 (0,0)

Nota: A_{T10} – absorção aos 10 minutos; A_{T90} – absorção aos 90 minutos; Sd – Desvio padrão; C – Absorção de água por capilaridade pelo método de Kelham (1988).

Por meio do gráfico da Figura 50 e da Figura 51, que relaciona o ganho de massa com a raiz quadrada do tempo, é possível verificar o comportamento de cada mistura ao longo do tempo.

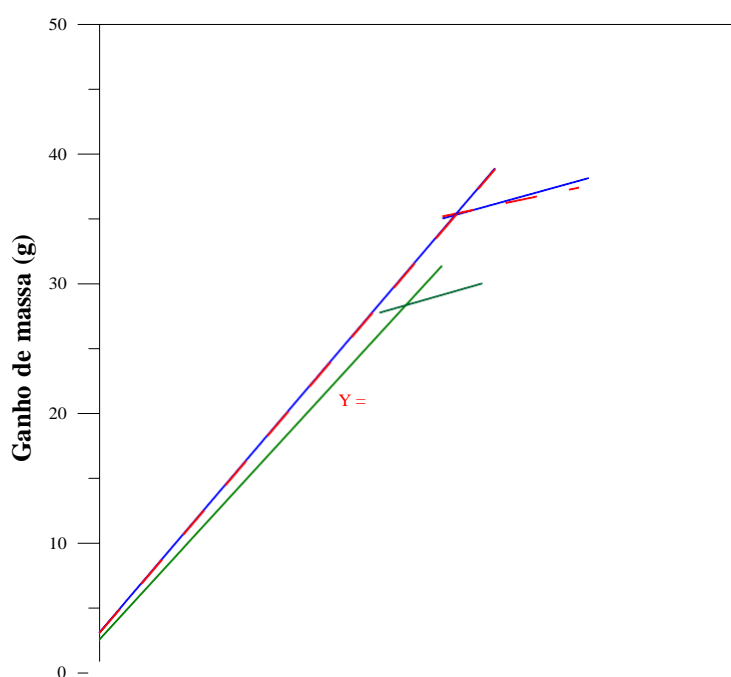


Figura 50 Resultados de capilaridade para as argamassas sem correção da relação a/c

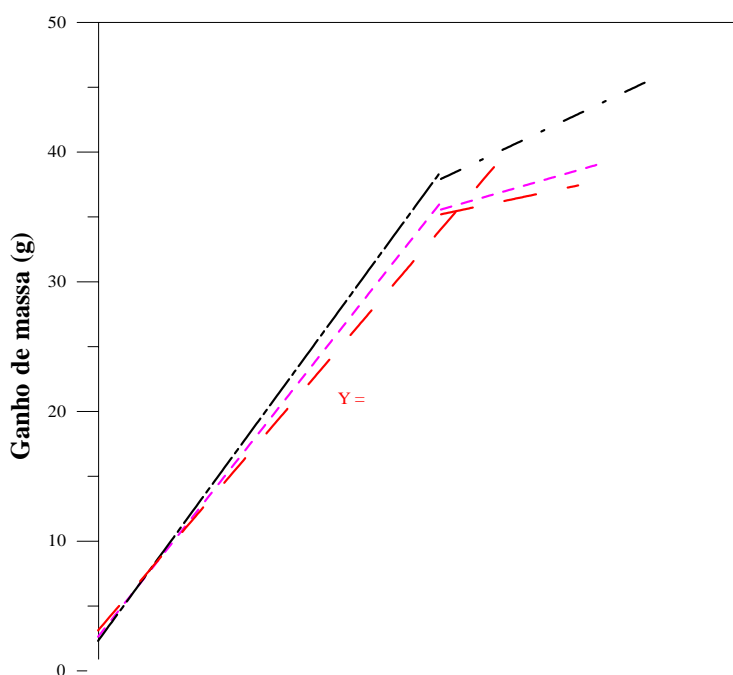


Figura 51 Resultados de capilaridade para as argamassas com correção da relação a/c

Uma análise dos resultados da Tabela 29 juntamente com a Figura 50 e a Figura 51 mostra que as argamassas 15%CC e 30%CC apresentaram uma maior absorção de água por capilaridade, quando comparadas a mistura REF. Os incrementos são de 8 % e 16 %, respectivamente (Figura 52). Como descrito no item 4.1.1 essas amostras demandaram uma maior quantidade de água para manter a trabalhabilidade, o que faz com que tenham um maior percentual de água livre para a formação de capilares, como identificado por ANDRADE *et al.* (2018) e Cuenca-Moyano *et al.* (2020) em seus trabalhos.

Já as misturas sem a correção da relação a/c (15%SC e 30%SC) apresentaram uma redução na absorção de 2 % e 9 %, respectivamente, quando comparadas a argamassa REF (Figura 52). Esse comportamento pode ser explicado pela redução da água efetiva da mistura que diminui a concentração de poros interconectados.

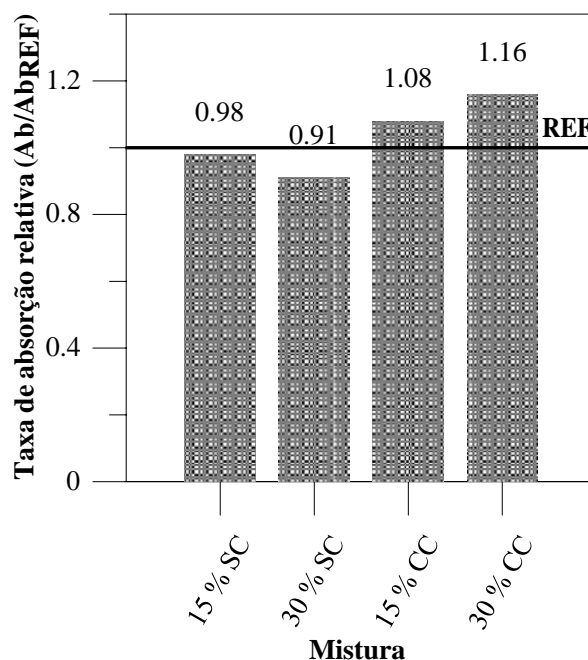


Figura 52 Taxa de absorção por capilaridade relativa para as argamassas

A influência do AR na mistura foi avaliada por meio da ANOVA e apresentada na Tabela 30. A análise indica que o uso do AR foi significativo para o ensaio de capilaridade.

Tabela 30 Resultados da ANOVA para o ensaio de absorção por capilaridade

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	P	Significância
A – Teor de AR	1	0,001136	460,6	0,000000	S
B – Correção da relação a/c	1	0,002812	250,00	0,000093	S
AB	1	0,000450	40,00	0,003198	S
Erro	4	0,000011			

Nota: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrada; P – valor do P teste; S – significativo.

Para a comparação múltipla entre as médias, foi realizado o teste de Tukey, que mostrou que as misturas 15%SC e 15%CC não apresentaram diferença significativa, quando comparadas à mistura de referência. As demais são consideradas estatisticamente diferentes, o que assinala que a utilização do AR promove alteração da absorção por capilaridade para maiores teores de substituição, seja com a diminuição da formação de capilares (30%SC), ou aumento (30%CC). Visto o aumento da absorção por capilaridade para as argamassas com maior teor de AR e compensação da relação a/c, uma alternativa para minimizar esse comportamento, seria o uso de aditivos superplastificantes para a correção da trabalhabilidade, ao invés de aumentar o consumo de água.

4.2.5 Permeabilidade pelo método do cachimbo

Para o ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo foram avaliadas as taxas de absorção média por minuto, que podem ser observadas na Tabela 31. Os resultados individuais para cada repetição do ensaio estão descritos no Apêndice A, Tabela 40.

Tabela 31 Taxa média de permeabilidade de água por minuto para cada amostra de argamassa de revestimento

Mistura	Taxa média de permeabilidade (ml/min) ± (ml/min) (%)
REF	0,05 ± 0,00 (9,4)
15%SC	0,05 ± 0,01 (20,2)
30%SC	0,04 ± 0,00 (10,9)
15%CC	0,08 ± 0,00 (6,1)
30%CC	0,10 ± 0,01 (9,7)

É possível verificar por meio da taxa média de permeabilidade e do comportamento mostrado pelo gráfico da Figura 53 que as misturas 15%CC e 30%CC são mais permeáveis dentre as amostras analisadas. Já as misturas REF, 15%SC e 30%SC tiveram comportamentos parecidos, apresentando valores menores aos das misturas com correção da relação água/cimento. Esses resultados são compatíveis com o ensaio de capilaridade mostrado na Seção 4.2.4, como esperado.

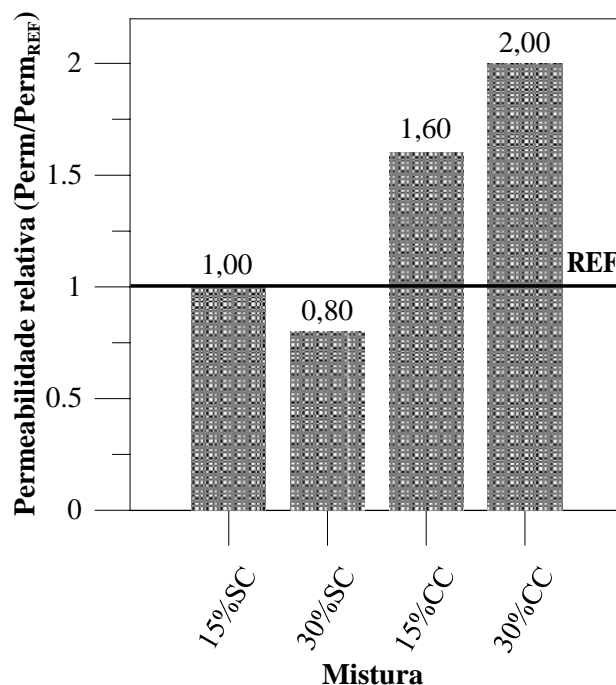


Figura 53 Permeabilidade relativa para as argamassas com AR em relação à mistura de referência

A Figura 54 ilustra o comportamento supracitado, permitindo verificar que, de forma geral, a adição do AR às misturas não promove uma grande alteração da permeabilidade.

Contudo, quando se adiciona uma maior quantidade de água às misturas para obter o espalhamento especificado, percebe-se que essa variável promove uma maior interferência nos resultados, como é o caso da mistura 30%CC. Os resultados foram analisados estatisticamente por meio da ANOVA, conforme apresentado na Tabela 32. É possível observar que o teor de AR não influenciou significativamente os resultados de permeabilidade, esse comportamento pode ser visto no gráfico da Figura 54.

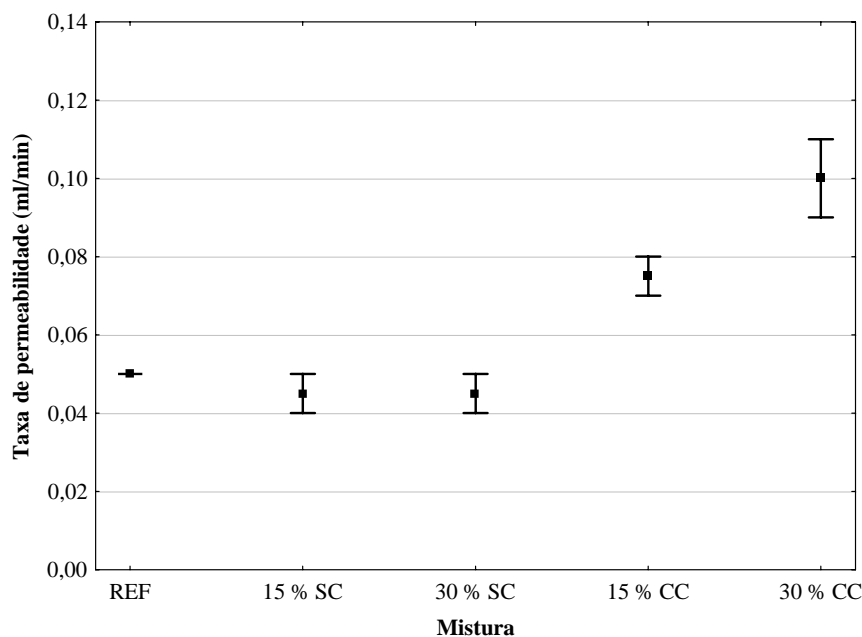


Figura 54 Influência do AR na taxa média de permeabilidade das argamassas de revestimentos

Tabela 32 Resultados da ANOVA para o ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	P	Significância
A – Teor de AR	1	0,000313	3,5714	0,131778	NS
B – Correção da relação a/c	1	0,003612	41,2857	0,003016	S
AB	1	0,000313	3,5714	0,131778	NS
Erro	4	0,000087			

Nota: GDL – graus de liberdade; MQ – média quadrada; P – valor do P teste; S – significativo; NS – não significativo.

Por meio do teste de Tukey (Apêndice B, Tabela 52), foi verificado que apenas a amostra 30%CC apresenta diferença significativa dentre as médias das misturas, sendo os demais valores estatisticamente semelhantes. Esse comportamento mostra que apesar da maior relação a/c para a mistura 15%CC, não houve incremento expressivo da porosidade capilar. O AR apresenta maior teor de partículas finas (inferiores a 75 μm), que favorece o efeito fíler, dessa forma, pode ajudar a reduzir a concentração de vazios interconectados.

Alvarenga (2018) e Girardi (2016) também realizaram esse ensaio para argamassas produzidas com AR. No primeiro trabalho avaliou-se a utilização de diferentes tipos de AR (argamassa, blocos cerâmicos e parede) a variados percentuais de substituição (30 e 50 %). Foi verificado que apenas as argamassas com AR de bloco cerâmico com percentual de substituição de 50 % apresentaram diferença significativa nos resultados, sendo as demais amostras estatisticamente iguais. No segundo trabalho foi testado um percentual de 100 % de substituição e alguns tipos de agregados (natural < 1,18 mm, natural < 3,00 mm, misto < 1,18 mm, misto < 3,00 mm e cimentício). Os resultados de permeabilidade indicaram que houve uma variabilidade entre as amostras, sendo que o revestimento produzido com um dos tipos de AN (< 3,00 mm) foi o que apresentou melhor desempenho dentre os avaliados. Esse resultado foi justificado pela menor relação água/materiais secos e pelo uso da cal nessa mistura. Dentre os revestimentos compostos por AR, o que apresentou melhor desempenho foi o produzido com material cimentício.

O comportamento para as argamassas desse estudo pode ser observado na Figura 55. É possível verificar o desempenho de cada mistura ao longo do tempo.

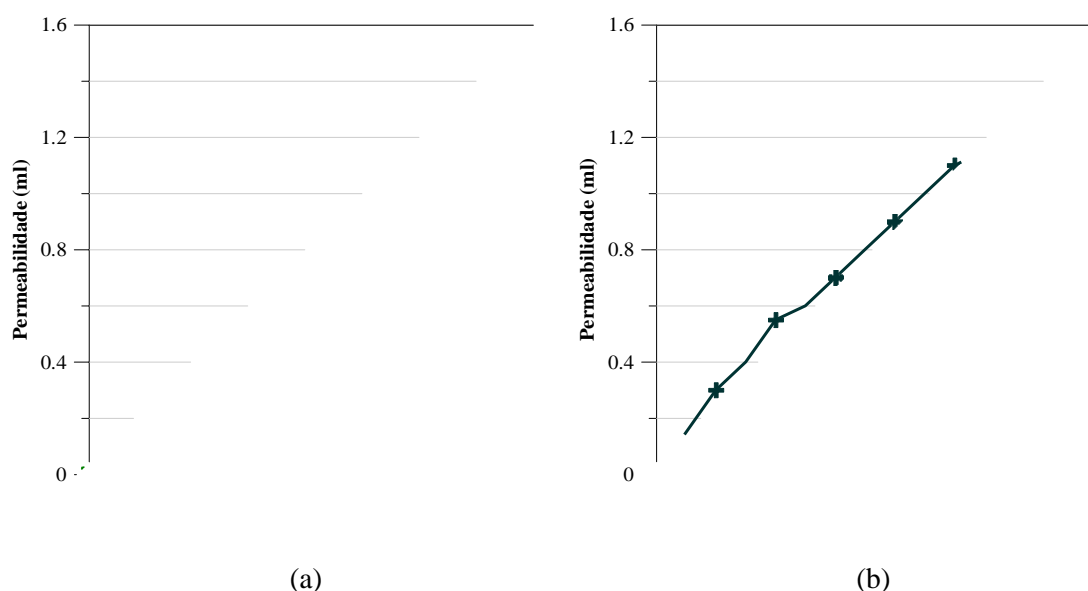


Figura 55 Permeabilidade à água em relação ao tempo para as argamassas estudadas: a) Misturas sem correção da relação a/c; b) Misturas com correção da relação a/c

Os resultados apresentados na Figura 55 mostram que a mistura 30%CC se apresentou, ao longo de todo o ensaio, com índices mais elevados de permeabilidade. Já as demais misturas apresentaram curvas mais próximas a da mistura de referência, com a mistura 15%CC se afastando da mistura REF nos últimos minutos de ensaio.

4.2.6 Retração por secagem

A retração por secagem e perda de massa foi avaliada por um período de 210 dias. O comportamento obtido para cada mistura em função do tempo está apresentado nos gráficos da Figura 56.

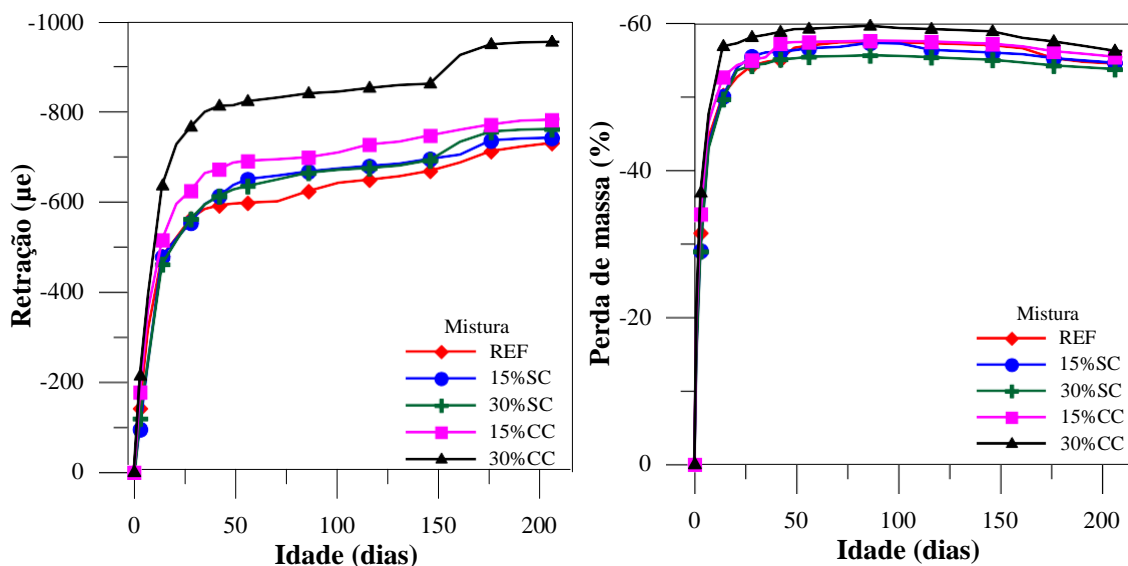


Figura 56 Retração e perda de massa média para as misturas avaliadas nesse estudo

É possível perceber que as argamassas 15%CC e 30%CC foram as que apresentaram a maior retração e perda de massa ao longo do tempo. Esse comportamento é indicado na literatura, pois quanto maior o percentual de água na mistura, maiores as deformações as quais as amostras estão suscetíveis a apresentar em função da variação dimensional ocasionada pela perda de água. Resultados semelhantes foram identificados por Girardi (2016) e Ledesma *et al.* (2015), que utilizaram AR de RCD para a produção de argamassas e também atribuíram esse comportamento a uma maior quantidade de água presente nas misturas produzidas com AR.

Ao estabelecer um comparativo com a mistura de referência, como mostrado na Tabela 33, percebe-se que as argamassas 15%CC e 30%CC apresentaram uma maior retração relativa, assim como, uma maior perda de massa relativa, sendo que a mistura 30%CC foi a que teve os maiores valores, dentre as amostras estudadas. Já as misturas sem correção da relação a/c apresentaram comportamentos distintos até os 3 dias de idade, posteriormente exibiram um desempenho parecido ao longo do tempo. Essa análise permitiu verificar que as argamassas 30%CC apresentam um alto potencial de retração,

chegando a ser 30 % superior a mistura REF aos 210 dias de idade, o que pode torná-las mais suscetíveis ao deslocamento, devido à alta variação volumétrica.

Quando se comparam todas as misturas é possível observar que as argamassas sem correção da relação a/c foram as que apresentaram a menor retração inicial. Esse fator pode ser explicado pela menor porosidade aberta apresentada para essas misturas. Os resultados obtidos para o ensaio de retração estão em consonância com o que foi observado para o ensaio de capilaridade, visto que as misturas que apresentaram maior retração e perda de massa foram também as mais permeáveis e com maior potencial de absorção.

Tabela 33 Retração por secagem e perda de massa relativas para argamassas estudadas em diferentes idades

Tempo de secagem (dias)	Mistura	Perda de massa \pm SD	Retração por secagem \pm SD	\square s/ \square S _{REF}	PM/PM _{REF}
		(CV) % \pm % (%)	(CV) $\mu\epsilon \pm \mu\epsilon$ ($\mu\epsilon$)		
3	REF	-141,5 \pm 28,7 (20,3)	-31,5 \pm 1,6 (5,0)	-	-
	15%SC	-95,2 \pm 4,0 (4,2)	-29,0 \pm 1,8 (6,3)	0,67	0,92
	30%SC	119,2 \pm 27,6 (23,19)	-29,0 \pm 1,5 (5,3)	0,84	0,92
	15%CC	-177,5 \pm 1,7 (0,9)	-34,0 \pm 0,7 (2,1)	1,25	1,08
	30%CC	-213,6 \pm 16,6 (7,8)	-36,9 \pm 1,1 (2,9)	1,51	1,17
7	REF	-314,8 \pm 29,8 (9,5)	-45,4 \pm 1,9 (4,1)	-	-
	15%SC	-242,1 \pm 15,9 (6,6)	-43,4 \pm 1,6 (3,7)	0,77	0,96
	30%SC	-242,4 \pm 10,7 (4,4)	-42,9 \pm 0,7 (1,6)	0,77	0,95
	15%CC	-357,6 \pm 5,3 (1,5)	-46,5 \pm 1,4 (3,0)	1,14	1,02
	30%CC	-391,3 \pm 36,5 (9,3)	-47,6 \pm 1,1 (2,3)	1,24	1,05
28	REF	-562,2 \pm 22,6 (4,0)	-54,2 \pm 0,8 (1,4)	-	-
	15%SC	-552,9 \pm 20,4 (3,7)	-55,5 \pm 2,9 (5,1)	0,98	1,02
	30%SC	-561,6 \pm 34,5 (6,1)	-54,2 \pm 1,5 (2,8)	1,00	1,00
	15%CC	-623,8 \pm 5,6 (0,9)	-55,0 \pm 0,8 (1,5)	1,11	1,01
	30%CC	-765,3 \pm 30,6 (4,0)	-58,1 \pm 1,2 (2,1)	1,36	1,07
86	REF	-623,0 \pm 27,8 (4,5)	-57,4 \pm 1,1 (1,9)	-	-
	15%SC	-666,7 \pm 32,3 (4,8)	-57,3 \pm 1,3 (2,4)	1,07	1,00
	30%SC	-663,6 \pm 43,1 (6,5)	-55,6 \pm 1,0 (1,8)	1,07	0,97
	15%CC	-698,0 \pm 5,2 (0,7)	-57,6 \pm 0,9 (1,6)	1,12	1,00
	30%CC	-839,8 \pm 21,5 (2,6)	-59,6 \pm 1,0 (1,7)	1,35	1,04
210	REF	-731,8 \pm 27,8 (3,8)	-54,4 \pm 1,1 (2,0)	-	-
	15%SC	-742,1 \pm 46,0 (6,2)	-54,6 \pm 1,5 (2,7)	1,01	1,00
	30%SC	-761,3 \pm 36,4 (4,8)	-53,5 \pm 1,0 (1,9)	1,04	0,98
	15%CC	-782,8 \pm 32,06 (4,1)	-55,3 \pm 0,8 (1,4)	1,07	1,02
	30%CC	-953,9 \pm 48,1 (5,0)	-56,2 \pm 1,6 (2,8)	1,30	1,02

Com base no que foi apresentado, verifica-se que a utilização de aditivos superplastificantes, por exemplo, poderiam ajudar a minimizar a retração e manter a trabalhabilidade das argamassas. Jiménez *et al.* (2013), por exemplo, citam que o uso de aditivos possibilitou a produção de argamassas com até 40 % de AR sem que ocorresse grandes alterações para a retração por secagem entre as misturas.

A perda de massa foi correlacionada à retração por secagem por meio das curvas apresentadas na Figura 57, vale salientar que ambas as propriedades foram avaliadas até os 210 dias de secagem. Verifica-se que há em cada curva três ramos distintos: o primeiro, representado pela reta OA, que se refere a perda de água presente nos grandes poros das argamassas; o segundo, o ramo AB, que descreve o comportamento para a perda de água dos pequenos capilares; e, o terceiro, o ramo BC, que corresponde ao ganho de massa, que como descrito por Lima e Leite (2012), é resultante do processo de retração por carbonatação das argamassas.

Nos primeiros dias ocorreu a perda de água dos grandes poros, esse comportamento é representado pelo ramo OA, e, que gera menor retração. Após esse período, inicia-se o processo de perda de água dos pequenos capilares (ramo AB), nessa etapa há maior retração, conforme é possível observar na Figura 57, que mostra que todas as misturas tiveram esse comportamento. No ramo BC está representada a retração por carbonatação e é possível observar que as misturas 15%CC e 30%CC foram as que apresentaram essa parte da curva mais bem definida, ou seja, tiveram maior retração por carbonatação durante o tempo de avaliação, 210 dias.

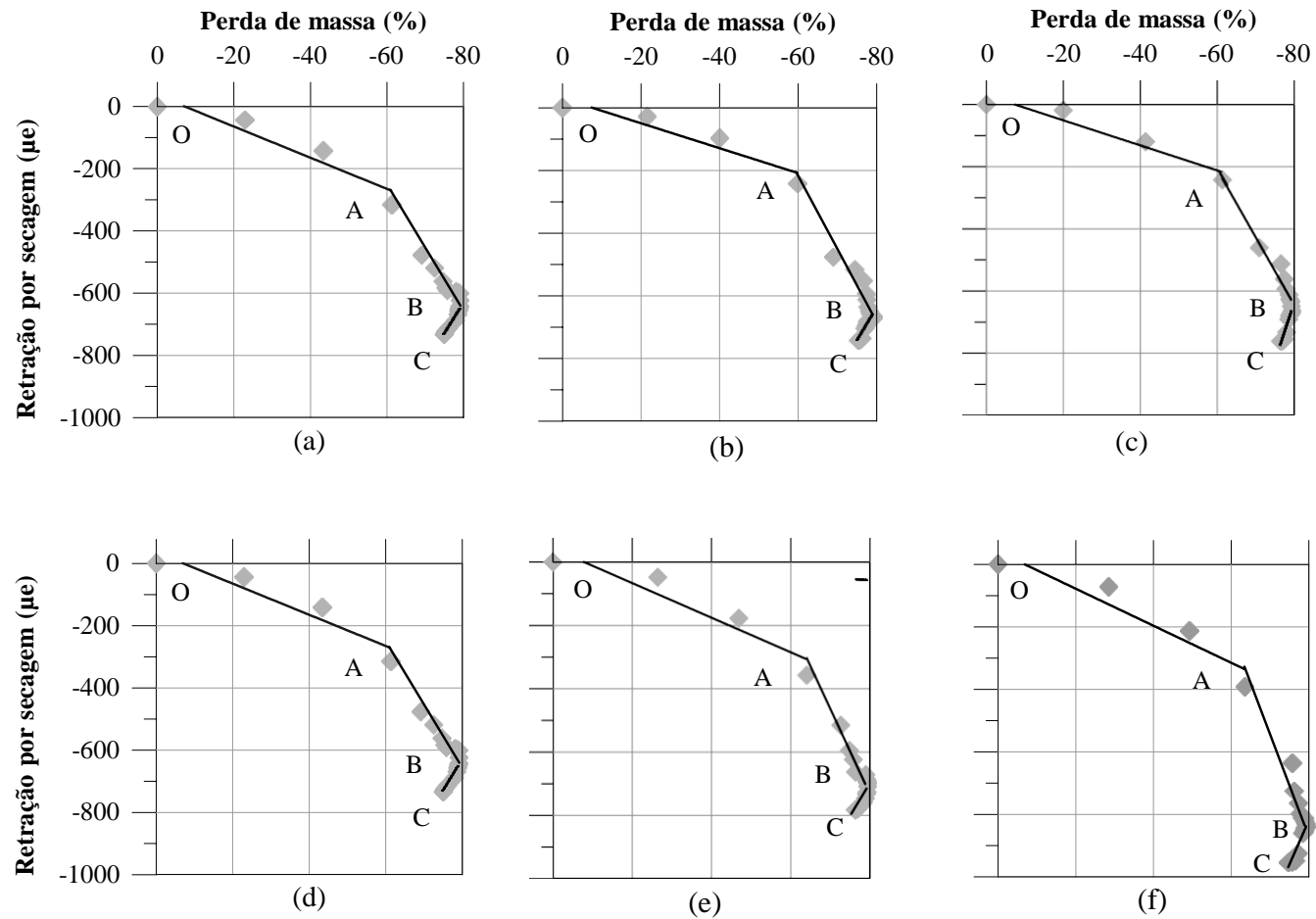


Figura 57 Retração por secagem *versus* perda de massa: a) argamassa REF; b) argamassa 15%SC; c) argamassa 30%SC; d) argamassa REF; e) argamassa 15%CC; f) argamassa 30%CC

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Esta pesquisa avaliou as propriedades de argamassas produzidas com 15 e 30 % de AR de RCD utilizando a metodologia de mistura proposta pela NBR 16541 (ABNT, 2016).

- i) Com relação a avaliação do método de mistura:
 - a) o estudo mostrou que o método de mistura da NBR 16541 (ABNT, 2016) apresentou resultados de consistência semelhantes aos obtidos pelas argamassas produzidas conforme a sequência de mistura da NBR 7215 (ABNT, 2019). O que mostra que para baixos teores de AR (até 30 %) o método de mistura não influenciou na trabalhabilidade das argamassas recicladas. Porém, vale enfatizar que para os traços com 30 % de AR houve um pequeno aumento na relação a/c (1 %) para as misturas que utilizaram a metodologia da NBR 7215 (ABNT, 2019), quando comparadas às misturas produzidas conforme a metodologia da NBR 16541 (ABNT, 2016). Isso mostra que seria importante investigar o efeito do tipo de mistura quando maiores teores de AR são usados na produção de argamassas recicladas.
- ii) Com relação aos resultados dos ensaios das argamassas no estado fresco:
 - a) as argamassas sem correção da água de mistura apresentaram um aspecto mais seco, principalmente a mistura 30%SC, e uma redução do espalhamento com a incorporação do AR. Para as argamassas com correção da relação a/c, foi necessário um maior consumo de água durante o processo de dosagem, sendo este superior em 6 e 12 % para as misturas 15%CC e 30%CC, respectivamente, em comparação com a mistura de referência, para obtenção de argamassas com espalhamento de 260 ± 5 mm;
 - b) o AR melhorou a capacidade de retenção de água para as argamassas recicladas, e quanto maior o teor de RCD na mistura, melhor o comportamento dessa propriedade;
 - c) houve diminuição da massa específica das argamassas com o aumento da proporção de AR nas misturas. esse comportamento pode estar relacionado aos materiais que compõem o resíduo, que são menos densos que os AN e também pela variação da relação a/c nas misturas;
 - d) o teor de ar incorporado sofreu maior influência da relação a/c empregada na produção do traço, pois foi verificado que quanto maior a quantidade de água total

na mistura para a formação de pasta, menor o teor de ar incorporado. As argamassas mais secas, ou seja, sem correção da relação a/c (15%SC e 30%SC), foram as que apresentaram o maior teor de ar, sendo 28 e 51 %, respectivamente, superiores às misturas de referência.

- iii) Com relação aos resultados dos ensaios das argamassas no estado endurecido:
- a) o aumento do teor de AR na mistura provocou uma redução da resistência à compressão das argamassas recicladas com compensação de água, quando comparadas às de referência, sendo que esse decréscimo foi menor, conforme aumentou-se o teor de AR. Também foi observado que para a resistência à compressão, aos 28 dias, não houve diferença significativa entre os resultados médios das misturas 15%CC e 30 %CC entre si, o que indica que para baixas proporções o aumento no percentual de AR não produz efeito negativo significativo sobre a resistência à compressão;
 - b) verificou-se uma redução de 15 % na resistência à tração para a argamassa 15%CC e a manutenção dos valores para a mistura 30%CC, quando comparadas a argamassa de referência, aos 28 dias;
 - c) o AR promoveu incremento na absorção de água por imersão e no índice de vazios das argamassas. Quanto maior a proporção de AR na mistura, maior também foi o aumento na porosidade, o que indica que a utilização desse tipo de material interfere diretamente nessas propriedades físicas. Também foi identificado que a maior relação a/c também faz aumentar a porosidade das misturas;
 - d) a argamassa 30%CC apresentou as maiores taxas de absorção de água por capilaridade. Sendo o aumento dos valores proporcionais ao percentual de substituição. Quando a relação a/c da mistura não foi corrigida (15%SC e 30%SC), verificou-se a redução da absorção por capilaridade. Esse comportamento indica que as argamassas com AR são mais suscetíveis a absorção por capilaridade devido a maior relação a/c necessária para manter a trabalhabilidade das misturas. Também foi verificado que a baixas proporções, as argamassas com 15 % de AR não apresentam diferença significativa quando comparadas a mistura de referência;
 - e) os resultados do ensaio de retração por secagem indicam que as argamassas 15%CC e 30%CC apresentaram retração superior à mistura de referência, o que aponta que a maior relação a/c produziu um efeito mais acentuado para essa

propriedade. Vale salientar que o incremento da retração foi proporcional ao teor de AR utilizado;

- f) a taxa média de permeabilidade, avaliada pelo método do cachimbo, apresentou um comportamento semelhante para as argamassas, com exceção da mistura 30%CC. Esses resultados indicam que a adição do AR às misturas até 15% não promove uma grande alteração da permeabilidade. Contudo, quando há uma maior quantidade de água livre, percebe-se uma maior interferência nos resultados.

Diante do que foi apresentado, observa-se que a utilização do AR promove alterações nas propriedades das argamassas tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, e essa interferência não foi minimizada pela adoção do método de mistura prescrito na NBR 16541 (ABNT, 2019), no qual a água é incorporada aos materiais secos em duas etapas durante o processo de mistura. Também é perceptível que conforme aumenta-se a proporção de RCD na mistura, há maiores modificações no comportamento das argamassas, que se deve, em parte, ao aumento da relação a/c para manter a trabalhabilidade das argamassas recicladas. Uma alternativa para essa condição seria o uso de aditivos superplastificantes para corrigir a trabalhabilidade.

Os resultados obtidos mostraram que as argamassas com compensação de água apresentaram tendência à redução da resistência à tração e à compressão, contudo, esse comportamento não é prejudicial às argamassas, visto que esse tipo de material precisa apresentar boa capacidade de deformação. Com base nisso, é interessante que se faça uma avaliação da aderência à tração, para verificar o comportamento dessas argamassas aplicadas em serviço. Também foi identificada uma melhoria na retenção de água e densidade de massa. Contudo, pelos maiores potenciais de absorção, estas misturas seriam mais indicadas para usos internos.

De forma geral, é perceptível que o uso do AR de RCD promove modificações nas propriedades das argamassas, tanto pelas suas diferentes características físicas, quanto pela maior demanda de água para manter a trabalhabilidade dentro dos níveis especificados. Contudo, foi verificado que é possível utilizar até 30 % de AR para a produção de argamassas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para melhor conhecer o comportamento de argamassas produzidas com material reciclado de RCD, segue alguns temas que poderão ser abordados em trabalhos futuros:

- Realizar um estudo da produção de argamassas com AR, utilizando aditivo superplastificante para a correção da trabalhabilidade das argamassas recicladas.
- Avaliar a influência do uso de diferentes tipos de misturadores na produção de argamassas com AR.
- Realizar um estudo da produção de argamassas com AR por meio do método da NBR 16541 (ABNT, 2016) utilizando a técnica de pré-molhagem dos AR.
- Avaliar a durabilidade de argamassas com AR produzidas por meio do método de mistura da NBR 16541 (ABNT, 2016).
- Verificar o comportamento de argamassas produzidas por meio do método de mistura da NBR 16541 (ABNT, 2016) utilizando fíler de RCD em substituição parcial do cimento.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, M. G. **Análise de desempenho de argamassas com utilização de resíduos de construção e demolição de alvenaria como substituto parcial de agregado miúdo natural**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 157**: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, 2014.
- ANDRADE, J. J. O.; POSSAN, E.; SQUIAVON, J. Z.; ORTOLAN, T. L. P. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70 – 83, 2018.
- ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V.; PILEGGI, R. G. **Influência da seqüência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliadas por squeeze-flow**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, In: **Anais**, ANTAC, Florianópolis, p 158 – 179, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Determinação do índice de Finura. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270 – 2**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Determinação do Tempo de Pega. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da Absorção de Água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Determinação da Massa Unitária. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregado miúdo - Determinação do Material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15270 - 3: Agregados - Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Relatório Pesquisa Setorial**. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC). **Panorama e perspectivas para o setor de agregados para construção**. Areia e Brita, ed. 69, p. 22, São Paulo, 2015.

BRAGA, M.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Incorporation of Fine Concrete Aggregates in Mortars. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 960 – 968, 2012.

CARASEK, H. Cap. 26 Argamassas. In: ISAIA, G. **Materiais de construção civil: princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.R; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v. 64, p. 288 – 300, 2018.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2009.

CARNEIRO, J. A. **Uso de agregado reciclado e fibras de aço em concreto simples e concreto armado sob flexão**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2011.

CASALI, J. M.; OLIVEIRA, A. L.; SANTOS, S.; CALÇADA, L. M. L.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. Avaliação da influência do processo de mistura na resistência à compressão de argamassas para assentamento de alvenaria estrutural. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, IV, In: **Anais**, ANTAC, Brasília, 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307/2002: **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Legislação. Brasília, DF, Seção 1, p. 95 – 96, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 448/2002: **Altera a os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução CONAMA no 307, de 5 de julho de 2002**. Legislação. Brasília, DF, Seção 1, p. 95 – 96, 2012.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S.R.; LUCAS, M.C.; LIMA, L.C.N.; CARDOSO, D.S.L.; SILVA, G.A.C. da.; GREGÓRIO, G.C. ; SOUZA, A.E. de; SANTOS, A. dos. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594 – 600, 2020.

CORINALDESI, V. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 505 – 510, 2009.

CUENCA-MOYANO, G.M.; Martín-Pascual, J.; MARTÍN-MORALES, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; Zamorano, M. Effects of water to cement ratio, recycled fine aggregate and air entraining/plasticizer admixture on masonry mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 230, n. 116929, 2020.

CUENCA-MOYANO, G.M.; MARTÍN-MORALES, M.; VALVERDE-PALACIOS, I.; VALVERDE-ESPINOSA, I. Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar, **Construction and Building Materials**, v. 70, p 71 – 79, 2014.

DILS J.; SCHUTTER G.; BOEL V. Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: A review. **Materials and Structures**, v. 45, p. 1673 – 1683, 2012.

EVANGELISTA, L.; GUEDES, M.; BRITO, J. DE; FERRO, A. C.; PEREIRA, M. F. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 178 – 188, 2015.

FARIAS, I. P. **Proposta de Modelo de Gestão de Resíduos da Construção Civil para a Zona Leste da Cidade de Teresina-PI**. 2014. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014.

FERNANDES, L. V. ; SILVA, V.M. FERREIRA, J.A. LABRINCHA. Evaluation of mixing and application process parameters of single-coat mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 836–841, 2005.

FERREIRA, R. L.S.; ANJOS, M. A.S.; NÓBREGA, A. K.C.; PEREIRA, J. E.S.; LEDESMA, E.F. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 601 – 612, 2019a.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; PEREIRA, J. E. S.; FONSECA, N. J. M.; NÓBREGA, A. K. C. Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (<150 mm) do agregado reciclado de RCD. **Cerâmica**, v. 65, p. 139-146, 2019b.

FERRO, G. A.; SPOTO, C.; TULLIANI, J. M.; RESTUCCIA, L. Mortar made of recycled sand from C&D. **Procedia Engineering**, v. 109, p. 240 – 247, 2015.

FERRON, R. D.; SHAH, S.; FUENTE, E.; NEGRO, C. Aggregation and breakage kinetics of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 50, p. 1 – 10, 2013.

FRANÇA, M. S. da. **Comportamento de mistura de sistemas cimentícios multifásicos reativos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

GIRARDI, A. C. C. **Avaliação da substituição total de areia natural por rcd em revestimentos de argamassa.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

GONÇALVES, P. H. **Planejamento e gerenciamento do resíduo sólido de construção e demolição – estudo de casos goianos.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

HAN, D.; FERRON, R. D. Influences of Mixing Methods on the Microstructure and Rheological Behavior of Cement Paste. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 278–288, 2015.

HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 271 – 288, 2017.

IVESON, S. M.; LITSTER, J. D.; HAPGOOD, K.; ENNIS, B.J. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. **Powder Technology**, v. 117, p. 3 – 39, 2001.

JESUS, S.; MAIA, C.; FARINHA, C. B.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste, **Construction and Building Materials**, v. 229, n. 116844, 2019.

JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de rcd: características físicas e propriedades da microestrutura.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

JIMÉNEZ, J.R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J.M.; BRITO, J. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 40, p 679 – 690, 2013.

KATZ, A.; KULISCH, D. Performance of mortars containing recycled fine aggregate from construction and demolition waste. **Materials and Structures**, v. 50, 2017.

KELHAM, S. A. Water Absorption Test For Concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 10, p. 106-110, 1988.

LE, T.; SAOUT, G. L.; GARCIA-DIAZ, E.; BETRANCOURT, D.; RÉMOND, S. Hardened Behavior of Mortar Based on Recycled Aggregate: influence of saturation state at macro- and microscopic scales. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 479 – 490, 2017.

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

- LEDESMA, E. F.; JIMENEZ, J. R.; AYUSO, J.; FERNÁNDEZ, J.M. BRITO, J. de. Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production e Part-I: ceramic masonry waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 692 – 706, 2015.
- LI, Z.; LIU, J.; XIAO, J.; ZHONG, P. A. Method to determine water absorption of recycled fine aggregate in paste for design and quality control of fresh mortar. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 30 – 41, 2019.
- LIMA, P. R. L.; LEITE, M. B. Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 2, n. 2, p. 53 – 57, 2012.
- LEITE M, FIGUEIRÊDO FILHO J, LIMA P. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. **Materials and Structures**, v. 46, p. 1765-1778, 2013.
- MALTA, J. O.; SILVEIRA, V. S.; GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência da pré-saturação do agregado miúdo reciclado na viscosidade e resistência à compressão de argamassas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 85 – 98, 2014.
- MARTIN, M.; RENAULT, M.; JEZEQUEL, P. H.; GARCIA, E. Mixability and particle size distribution criteria – study on model materials. **Powder Technology**, v. 190, p. 36 – 40, 2009.
- MARTINÉZ, 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**, v. 118, p. 162–169, 2016.
- MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 601 – 605, 2009.
- MIRANDA, L.; ANGULO, S.C.; CARELI, E.D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57 – 71, 2009.
- MONTE JÚNIOR, I. V. **Influência do agregado reciclado de concreto no comportamento de argamassas mistas para uso em revestimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- MORALES, B. R. S. C. **Avaliação da influência das frações de agregado reciclado nas propriedades das argamassas de revestimento**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. Revisão de norma NBR 13281 como instrumento para melhor representar o desempenho de argamassas industrializadas em obra. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, IV, In: **Anais**, ANTAC, Brasília, p. 387 – 394, 2001.

NENO, C. J. F.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Using Fine Recycled Concrete Aggregate For Mortar Production. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 168 –177, 2014.

OLIVEIRA, M. E. D. **Agregado Reciclado de Construção e Demolição: influência em propriedades de argamassas para revestimento**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2012.

PARK , K. B.; PLAWSKY, J.L.; LITTMAN, H.; PACCIONE, J.D. Mortar properties obtained by dry premixing of cementitious materials and sand in a spout-fluid bed mixer. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 728 – 734, 2006.

PAVÓN, E.; MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M. The production of construction and demolition waste material and the use of recycled aggregates in Havana, Cuba. **Revista Facultad de Ingeniería**, v. 71, p. 167–178, 2014.

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

PLAWSKY, J.L.; JOVANOVICA, S.; LITTMANA, H.; HOVERB, K.C. ; GEROLIMATOS, S. ; DOUGLAS, K. Exploring the effect of dry premixing of sand and cement on the mechanical properties of mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 255 – 264, 2003.

PRASITTISOPIN, L. TREJO, D. Effects of Mixing Variables on Hardened Characteristics of Portland Cement Mortars. **ACI Materials Journal**, v. 111, p. 1 – 6, 2014.

RESTUCCIA, L.; SPOTO, C.; FERRO, G. A.; Recycled Mortars With C&D Waste, **Procedia Structural Integrity**, v. 2, p. 2896 – 2904, 2016.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; SILVA, F. B.; CARDOSO, F. A.; BARROS, M. M. S. B.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Impacto do tipo de misturador e do tempo de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 109 – 118, 2009.

REJEB, S. K. Improving Compressive Strength of Concrete By a Two-Step Mixing Method. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 4, p. 585-592, 1996.

SÁEZ, P. V.; ASTORQUI, J. S. C.; MERINO, M. D. R.; MOYANO, M. D. P. M.; SÁNCHEZ, A. R. Estimation of construction and demolition waste in building energy efficiency retrofitting works of the vertical envelope. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2978 – 2985, 2018.

SILVA, J.; BRITO, J. de; DHIR, R. K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 400 – 415, 2016.

SILVA, J.; BRITO, J. de; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201 – 217, 2014.

SILVA NETO, G. A.; LEITE, M. B. Study of the influence of the mortar fine recycled aggregate ratio and the mixing sequence on the behavior of new mortars. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 53 – 69, 2018.

TAKAHASHI, K.; BIER, T. A.; WESTPHAL, T. Effects of Mixing Energy on Technological Properties and Hydration Kinetics of Grouting Mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1167 – 1176, 2011.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MASINI, E. A.; ÂNGULO, S. C. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. **Waste Management**, v. 33, p. 656–662, 2013.

WILLIAMS, D. A.; SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M. The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1491 – 1496, 1999.

YANG, M.; JENNINGS, H. M. Influences of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste. **Adv Cem Bas Mat**, v. 2, p. 70 – 78, 1995.

YACOUB, A.; DJERBI, A.; FEN-CHONG, T. Water absorption in recycled sand: New experimental methods to estimate the water saturation degree and kinetic filling during mortar mixing. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 464 – 471, 2018.

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

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO PARA AS ARGAMASSAS AVALIADAS NESSE ESTUDO

Tabela 34 Resultados individuais de consistência

Mistura	Consistência (mm) – NBR 16541 (ABNT, 2016)		Consistência (mm) – NBR 7215 (ABNT, 2019)	
	Determinação 1	Determinação 2	Determinação 1	Determinação 2
	REF	263	261	258
15%SC	231	230	228	227
30%SC	214	213	210	208
15%CC	260	258	261	262
30%CC	261	261	257	256

Tabela 35 Resultados individuais de retenção de água

Mistura	Retenção de água (%)	
	Determinação 1	Determinação 2
REF	73	74
15%SC	75	74
30%SC	78	78
15%CC	76	76
30%CC	81	82

Tabela 36 Resultados individuais de densidade de massa e teor de ar incorporado

Mistura	Densidade de massa (kg/m ³)		Teor de ar incorporado (%)	
	Determinação 1	Determinação 2	Determinação 1	Determinação 2
REF	2109	2100	5,68	6,08
15%SC	2064	2064	7,49	7,52
30%SC	2032	2026	8,77	9,02
15%CC	2070	2065	6,46	6,65
30%CC	2041	2038	6,79	6,92

Tabela 37 Resultados individuais de resistência à compressão

Mistura	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
REF	14,31	16,67
	13,97	17,11
	14,25	16,96
	14,63	17,51
15%SC	15,22	18,56
	14,81	18,94
	15,25	18,97
	14,90	18,88
30%SC	15,59	19,53
	15,06	19,40
	15,58	19,65
	15,28	20,26
15%CC	13,49	15,18
	13,32	14,83
	13,68	14,82
	12,85	15,10
30%CC	13,10	15,87
	13,15	15,18
	13,78	15,52
	13,71	15,86

Tabela 38 Resultados individuais de resistência à tração na flexão

Mistura	Resistência à tração (MPa)			Resistência à tração (MPa)		
	7 dias			28 dias		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
REF	4,11	4,24	3,88	4,94	5,00	5,13
15%SC	4,90	5,07	4,90	5,71	6,06	5,80
30%SC	5,29	5,10	5,23	7,10	7,92*	7,42
15%CC	3,82	3,76	3,52	4,94*	4,19	4,35
30%CC	4,28	4,50	4,54	5,00	4,93	4,98

Nota: * Amostras descartadas para o cálculo da média, para reduzir o coeficiente de variação.

Tabela 39 Resultados individuais para o ensaio de absorção por imersão

Mistura	Absorção por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)
REF	10,60	23,90	2,65	1,96	2,20
	11,35	24,53	2,54	1,89	2,12
	10,99	24,46	2,62	1,95	2,19
15%SC	11,69	25,52	2,59	1,93	2,19
	11,54	25,23	2,59	1,93	2,18
	11,57	25,24	2,58	1,93	2,19
30%SC	12,00	25,97	2,57	1,91	2,18
	11,61	25,30	2,58	1,93	2,18
	11,79	25,58	2,57	1,92	2,18
15%CC	13,48	25,81	2,58	1,91	2,17
	13,50	25,76	2,57	1,91	2,17
	13,90	26,44	2,59	1,90	2,17
30%CC	14,51	26,91	2,54	1,88	2,15
	14,97	27,83	2,58	1,87	2,14
	14,97	27,89	2,58	1,87	2,15

Tabela 40 Resultados individuais para a taxa de permeabilidade

Mistura	Taxa de permeabilidade (ml/min)	
	Determinação 1	Determinação 2
REF	0,05	0,05
15%SC	0,04	0,05
30%SC	0,04	0,05
15%CC	0,08	0,07
30%CC	0,11	0,09

Tabela 41 Resultados individuais para o ensaio de absorção por capilaridade

Mistura	A _{T10}			A _{T90}		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
REF	0,188	0,124*	0,189	0,476	0,344*	0,464
15%SC	0,179	0,172	0,187	0,481	0,448	0,477
30%SC	0,168	0,205*	0,171	0,444	0,460	0,443
15%CC	0,213	0,219	0,235*	0,480	0,488	0,531*
30%CC	0,241	0,225	0,231	0,557	0,528	0,521

Nota: A_{T10} – Absorção por capilaridade aos 10 minutos; A_{T90} – Absorção por capilaridade aos 90 minutos; * amostras descartadas para o cálculo da média, para reduzir o coeficiente de variação.

Tabela 42 Resultados médios do ensaio de retração por secagem e perda de massa para as argamassas desse estudo

Tempo de secagem (dias)	REF		15%SC		30%SC		15%CC		30%CC	
	Retração por secagem ($\mu\epsilon$)	Perda de massa (%)	Retração por secagem ($\mu\epsilon$)	Perda de massa (%)	Retração por secagem ($\mu\epsilon$)	Perda de massa (%)	Retração por secagem ($\mu\epsilon$)	Perda de massa (%)	Retração por secagem ($\mu\epsilon$)	Perda de massa (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-43,65	-16,67	-27,78	-15,60	-18,53	-13,97	-47,66	-19,17	-71,62	-21,37
3	-141,53	-31,48	-95,24	-29,04	-119,18	-28,96	-177,48	-34,01	-213,56	-36,91
7	-314,81	-45,41	-242,06	-43,44	-242,39	-42,94	-357,61	-46,45	-391,30	-47,64
14	-478,84	-51,21	-477,51	-50,01	-460,92	-49,65	-515,16	-52,66	-635,37	-56,84
21	-519,84	-52,62	-517,20	-53,91	-512,61	-53,57	-594,69	-54,25	-726,85	-57,23
28	-562,17	-54,17	-552,91	-55,46	-561,60	-54,19	-623,84	-54,95	-765,29	-58,05
35	-583,33	-54,70	-593,92	-55,97	-593,41	-54,46	-662,84	-55,33	-798,46	-58,37
42	-591,27	-55,01	-612,43	-56,09	-611,95	-55,07	-671,52	-57,24	-811,71	-58,78
49	-595,24	-56,61	-636,24	-56,27	-626,52	-55,17	-686,10	-57,39	-813,05	-59,15
56	-597,12	-56,90	-649,47	-56,55	-634,47	-55,41	-690,20	-57,42	-822,09	-59,19
71	-600,53	-57,35	-657,41	-56,74	-649,04	-55,48	-693,50	-57,48	-830,14	-59,40
86	-623,02	-57,39	-666,67	-57,28	-663,62	-55,61	-697,99	-57,61	-839,78	-59,61
101	-641,53	-57,33	-673,28	-57,19	-670,24	-55,50	-708,58	-57,57	-843,59	-59,29
116	-648,15	-57,25	-678,57	-56,34	-674,21	-55,34	-726,51	-57,48	-851,54	-59,17
131	-656,08	-57,10	-683,86	-56,16	-679,61	-55,15	-732,49	-57,33	-858,19	-59,01
146	-667,99	-56,97	-694,44	-55,95	-691,42	-54,98	-746,39	-57,16	-860,86	58,85
161	-686,51	-56,55	-703,70	-55,74	-732,45	-54,62	-759,29	-56,81	-924,52	-57,96
176	-711,64	-55,20	-735,45	-55,20	-754,96	-54,21	-770,70	-56,16	-948,39	-57,48
191	-721,55	-54,70	-739,38	-54,89	-759,04	-53,97	-779,23	-55,80	952,58	-56,88
206	-729,72	-54,47	-741,26	-54,60	-760,75	-53,73	-781,49	-55,40	953,75	-56,21
210	-731,80	-54,41	-742,07	-54,55	-761,32	-53,49	-782,81	-55,31	953,91	-56,15

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS TESTES DE TUKEY

Tabela 43 Teste de Tukey para o ensaio de retenção de água

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,329324*	0,009115	0,045672	0,001854
15%SC	0,329324*		0,018414	0,124529*	0,000738
30%SC	0,009115	0,018414		0,052993*	0,007718
15%CC	0,045672	0,124529*	0,052993*		0,005181
30%CC	0,001854	0,000738	0,007718	0,005181	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 44 Teste de Tukey para o ensaio de densidade de massa

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,005767	0,001069	0,007258	0,001546
15%SC	0,005767		0,008690	0,666673*	0,004185
30%SC	0,001069	0,008690		0,000910	0,076716*
15%CC	0,007258	0,666673*	0,000910		0,015870
30%CC	0,001546	0,004185	0,076716*	0,015870	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 45 Teste de Tukey para o ensaio de teor de ar incorporado

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,007331	0,001352	0,073926*	0,028429
15%SC	0,007331		0,011370	0,005030	0,019550
30%SC	0,001352	0,011370		0,005030	0,000463
15%CC	0,073926*	0,005030	0,000379		0,373774*
30%CC	0,028429	0,000463	0,000463	0,373774*	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 46 Teste de Tukey para o ensaio de absorção por imersão

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,050824*	0,016081	0,000280	0,000228
15%SC	0,050824*		0,611353*	0,000233	0,000231
30%SC	0,016081	0,611353*		0,000238	0,000231
15%CC	0,000280	0,000233	0,000238		0,006751
30%CC	0,000228	0,000231	0,000231	0,006751	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 47 Teste de Tukey para o ensaio de índice de vazios

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,012164	0,003816	0,007184	0,000428
15%SC	0,012164		0,498843*	0,215438*	0,000654
30%SC	0,003816	0,498843*		0,622664*	0,001377
15%CC	0,007184	0,215438*	0,622664*		0,011599
30%CC	0,000428	0,000654	0,001377	0,011599	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 48 Teste de Tukey para o ensaio de resistência à compressão, aos 7 dias

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,019621	0,001052	0,003206	0,007874
15%SC	0,019621		0,532176*	0,000152	0,000156
30%SC	0,001052	0,532176*		0,000150	0,000150
15%CC	0,003206	0,000152	0,000150		0,988621*
30%CC	0,007874	0,000156	0,000150	0,988621*	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 49 Teste de Tukey para o ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,000151	0,000150	0,000150	0,000178
15%SC	0,000150		0,064311*	0,000150	0,000150
30%SC	0,000150	0,064311*		0,000150	0,000150
15%CC	0,000150	0,000150	0,000150		0,062987*
30%CC	0,000178	0,000150	0,000150	0,062987*	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 50 Teste de Tukey para o ensaio de resistência à tração na flexão, 7 dias

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,000260	0,000180	0,048621	0,058289
15%SC	0,000260		0,255545*	0,000177	0,007509
30%SC	0,000180	0,255545*		0,000176	0,000506
15%CC	0,048621	0,000177	0,000176		0,000628
30%CC	0,058289*	0,007509	0,000506	0,000628	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 51 Teste de Tukey para o ensaio de resistência à tração na flexão, 28 dias

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,000656	0,000208	0,002295	0,987721*
15%SC	0,000656		0,000216	0,000210	0,000486
30%SC	0,000208	0,000216		0,000208	0,000208
15%CC	0,002295	0,000210	0,000208		0,003586
30%CC	0,987721*	0,000486	0,000208	0,003586	

Nota: * Não houve diferença significativa.

Tabela 52 Teste de Tukey para o ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo

Teor de substituição	REF	15%SC	30%SC	15%CC	30%CC
REF		0,694620*	0,694620*	0,138470*	0,024362
15%SC	0,694620*		1,000000*	0,103319*	0,014392
30%SC	0,694620*	1,000000*		0,103319*	0,014392
15%CC	0,138470*	0,103319*	0,103319*		0,138470*
30%CC	0,024362	0,014392	0,014392	0,138470*	

Nota: * Não houve diferença significativa.