

MARIANA BAMBERG AMARAL

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE
AGREGADOS POROSOS SECOS E PRÉ-MOLHADOS EM
ARGAMASSAS**

Dissertação de Mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Janaíde Cavalcante Rocha

**Florianópolis
2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Amaral, Mariana
AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS
POROSOS SECOS E PRÉ-MOLHADOS EM ARGAMASSAS / Mariana
Amaral ; orientador, Janaide Cavalcante Rocha, 2019.
207 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Agregados reciclados e
leves. 3. Absorção. 4. Pré-molhagem. 5. Argamassas.
I. Cavalcante Rocha, Janaide. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

Mariana Bamberg Amaral

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE
AGREGADOS POROSOS SECOS E PRÉ-MOLHADOS EM
ARGAMASSAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFSC.

Florianópolis, 22 de março de 2019.

Prof. Roberto Lamberts, Dr.
Coordenador do PPGEC

Banca Examinadora:

Prof.^a Janaíde Cavalcante Rocha, Dra.
Orientadora

Prof. Adriano Michael Bernardin, Dr.
Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a CAPES e ao CNPq pelo incentivo à pesquisa e apoio financeiro.

À minha orientadora Janaíde Cavalcante Rocha, pelo acolhimento no laboratório ValoRes, orientação e conhecimentos compartilhados. Também ao professor Malik pelos ensinamentos e ajuda durante a pesquisa.

Também a todos os professores do PPGEC por todos os ensinamentos compartilhados!

Agradeço imensamente à minha família, pela paciência, amor e carinho durante toda essa caminhada.

Ao meu pai, minha “mãedrastra” Luciane e minha amada irmã Andressa, por entender a ausência do dia-a-dia, por todo amor e carinho, e apoio incansável neste e em muitos outros momentos. À Rosalva, que foi mãe, vó e amiga, por todos os conselhos, desabafos e amor incondicional que me destes! E ao meu avô Altino por nunca deixar esquecer da criança que tem dentro de mim, obrigada por todo amor! Agradeço também a minha mãe Sonaly e meu Irmão Samuel, que nunca deixaram de estar presentes neste momento, por todo amor e apoio que me deram!

Sem o apoio e amor de todos vocês eu nada seria!!!

Ao meu querido amigo e companheiro Eduardo, por toda ajuda nos momentos em que mais precisei. Pelos chimarrões, idas a feira, praias, companheirismo de toda hora! Tu com certeza tornaste está carga muito mais leve.

Não teria como não agradecer ao nosso quarteto querido, eu, Eduardo, Ariane e Régis, que foram o presente mais lindo que o mestrado me proporcionou! Obrigada a vocês por essa amizade linda, por todas as praias, por todos os pôr de sol, chimarrões, jantas, bares, alegrias e momentos que passamos.

Agradeço também à minha amiga de toda vida Vanessa, que acompanha minha caminhada desde cedo, que me incentiva, cuida e apoia com todo o coração! Obrigada pelo companheirismo, pelos momentos de descontração, pela amizade e parceria de sempre.

Também aos amigos Aline, Hector e Luís Felipe, por todos os momentos que passamos juntos, pelas jantas, bares, conversas, vinhos e cervejas! Vou levar vocês sempre comigo.

E aos colegas do PPGEC pelos trabalhos, horas de estudo e parceria durante o período do mestrado.

Aos laboratoristas Luiz e Renato e ao funcionário Nivaldo e Priscila, por toda ajuda e ensinamentos.

Enfim, obrigada à Deus por tudo que tenho, por tudo que conquisei e por todas as pessoas lindas que tenho ao meu redor!

RESUMO

AMARAL, Mariana Bamberg. **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS POROSOS SECOS E PRÉ-MOLHADOS EM ARGAMASSAS**. 2019. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

O processo de urbanização, que ocorreu de maneira acelerada em todo o mundo, ocasionou um consumo desenfreado dos recursos naturais e a consequente geração de resíduos. Estes resíduos são gerados principalmente pelo setor da construção civil, que há muitos anos vem sendo estudado para utilização em argamassas e concretos, incentivando assim, uma destinação adequada para os mesmos. Neste sentido, este trabalho avalia a influência das características de absorção dos agregados reciclados de construção e demolição, nas propriedades mecânicas e na microestrutura dos materiais cimentícios, através da substituição de 20% dos agregados naturais (areia natural padrão) por três tipos de agregados: agregado reciclado de concreto, agregado reciclado de cerâmica e agregado leve, em cinco diferentes dimensões das partículas 0,15mm, 0,3mm, 0,6mm, 1,2mm e 2,4mm, com condições de pré-molhagem e secagem dos mesmos. A pré-molhagem pode colaborar para a cura interna das argamassas, devido à liberação lenta de água (contida nos poros dos agregados) que pode ocorrer até as idades mais avançadas de hidratação. As argamassas foram avaliadas em duas condições de cura: autógena e umidade relativa (HR) de 47%. Os resultados indicam aumento da resistência mecânica proporcional ao aumento das dimensões das partículas dos agregados reciclados de concreto e cerâmica, para cura em HR de 47%. Por outro lado, este comportamento se mostrou inverso na cura autógena. Em argamassas com agregados leves, o aumento nas propriedades mecânicas ocorreu devido à diminuição da dimensão das partículas. Em relação à retração, as argamassas tiveram comportamentos distintos, com diferentes curas e condição de saturação dos agregados. Através do ensaio de adsorção, pode-se classificar a estrutura porosa das argamassas estudadas em macroporosa, ou seja, com pouca presença de poros. Também foi avaliada a absorção de água por capilaridade, após 28 dias de cura, poucas misturas apresentaram valores inferiores à referência, indicando que os poros capilares são menores, tornando-as mais resistentes e duráveis.

Palavras-chaves: Agregados reciclados e leves, absorção, pré-molhagem, argamassas.

ABSTRACT

AMARAL, Mariana Bamberg. **EVALUATION OF THE EFFECT THE INCORPORATION POROUS AGGREGATES OF DRY AND PRE-WETTING IN MORTARS.** 2019. Federal University of Santa Catarina, Florianópolis.

The accelerated development of urban centers around the world has as its main consequences the uncontrolled consumption of natural resources and the generation of waste. During many years, the construction and demolition waste has been studied for use as aggregates in mortars and concretes. In this goal, this work evaluates the influence of the absorption characteristics of the recycled aggregates of construction and demolition, waste regarding the mechanical properties and the microstructure of the cementitious mortars. Replacing 20% of the natural aggregates by three types of aggregates: recycled aggregate of concrete, recycled ceramic waste aggregate and lightweight aggregate of expanded clay (used like reference due to its absorption), in five different fractions of the grains 0,15mm, 0,3mm, 0,6mm, 1,2mm and 2,4mm, with water-pre-saturation conditions. The pre-saturation can contribute to the internal cure of the mortars, due to the slow release of water (contained in the pores of the aggregates) that can occur until advanced ages of hydration. The mortars were evaluated under two cure conditions: autogenous and RH of 47%. The results indicate an increase in the mechanical proprieties proportional to the increase of the grain size of the recycled aggregates of concrete and ceramic waste for cure in RH of 47%. On the other hand, this behavior was inverse to the autogenous cure. In mortars with lightweight aggregates, the increase in mechanical proprieties occurred due to the decrease in grain size. About shrinkage, the mortars had different behaviors, with different cures and the saturation of the aggregates. Through the adsorption test, it is possible to classify the porous structure of the mortars studied as macroporous, that is, with little presence of pores. Water absorption by capillarity was also evaluated after 28 days of curing, few mixtures presented values lower than the reference, indicating that the capillary pores are smaller, making them more resistant and durable.

Keywords: Recycled aggregates. Absorption. Pre-wetting. Mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Origem dos agregados leves.....	40
Figura 2: Condições de umidade das partículas do agregado.....	43
Figura 3: Agregado leve e comum e sua influência na zona de transição	47
Figura 4: Tipos de poros de uma matriz cimentícia.....	51
Figura 5: Transporte de água devido à hidratação do cimento conforme mecanismo proposto por Feldman e Sereda (1970).....	58
Figura 6: Água entre as folhas de C-S-H.....	59
Figura 7: Representação esquemática da retração química e retração autógena.....	61
Figura 8: Diferentes tipos de curvas de adsorção e dessorção de um material.....	66
Figura 9: Comportamento das curvas de adsorção.....	67
Figura 10: Curvas genéricas de Adsorção e dessorção de materiais de construção civil.....	69
Figura 11: Processo para encontrar a superfície saturada seca dos agregados. (a) Amostra compactada no molde; (b) Amostra com umidade superficial; (c) Amostra na SSS.....	78
Figura 12: Aparelho utilizado para medir a variação dimensional das amostras.....	85
Figura 13: Dessecador com as amostras ensaiadas e umidade relativa de 6%.....	88
Figura 14: Flow (espalhamento) das misturas. (a) AL 0,6 M com pouca água livre na moldagem; (b) AL 0,6 S com água livre na moldagem... ..	97
Figura 15: Resistência à compressão da argamassa ARCN com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e pré-molhagem).....	102

Figura 16: Resistência à compressão da argamassa ARCN com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e pré-molhagem)	102
Figura 17: Resistência à compressão da argamassa ARCE com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e pré-molhagem).....	103
Figura 18: Resistência à compressão da argamassa ARCE com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e pré-molhagem)	104
Figura 19: Resistência à compressão da argamassa AL com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e pré-molhagem).....	105
Figura 20: Resistência à compressão da argamassa AL com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e pré-molhagem)	105
Figura 21: Resistência à compressão da argamassa ARCN com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e agregados secos).....	107
Figura 22: Resistência à compressão da argamassa ARCN com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e agregados secos).....	107
Figura 23: Resistência à compressão da argamassa de referência em comparação às misturas ARCE com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e agregados secos).....	108
Figura 24: Resistência à compressão da argamassa ARCE com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e agregados secos).....	109
Figura 25: Resistência à compressão da argamassa AL com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e agregados secos).....	110
Figura 26: Resistência à compressão da argamassa AL com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e agregados secos).....	110
Figura 27: Gráfico da retração da argamassa ARCN de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados pré-molhados ..	124
Figura 28: Gráfico da retração da argamassa ARCE de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados pré-molhados ..	125

Figura 29: Gráfico da retração da argamassa AL de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados pré-molhados	126
Figura 30: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa referência em comparação as misturas ARCN de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% de HR e agregados pré-molhados	127
Figura 31: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa referência em comparação as misturas ARCE de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% de HR e agregados pré-molhados.....	128
Figura 32: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa referência em comparação as misturas AL de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% de HR e agregados pré-molhados.....	128
Figura 33: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa ARCN de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados secos	130
Figura 34: Gráfico da variação da massa e retração da ARCE de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados secos.....	131
Figura 35: Gráfico da variação da massa e retração da AL de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados secos.....	131
Figura 36: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa ARCN de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% HR e agregados secos	132
Figura 37: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa ARCE de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% HR e agregados secos	133
Figura 38: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa referência em comparação as misturas AL de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% HR e agregados secos.....	134

Figura 39: Gráfico da adsorção da mistura referência com cura autógena	144
Figura 40: Gráfico da adsorção da mistura ARCN com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	145
Figura 41: Gráfico da adsorção da mistura ARCE com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	146
Figura 42: Gráfico da adsorção da mistura AL com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	147
Figura 43: Gráfico da adsorção da mistura Referência com cura a 47% HR.....	148
Figura 44: Gráfico da adsorção da mistura ARCN com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura a 47% HR, (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	148
Figura 45: Gráfico da adsorção da mistura ARCE com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura a 47% HR. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	150
Figura 46: Gráfico da adsorção da mistura AL com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura a 47% HR. (a)	

Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	151
Figura 47: Gráfico da área superficial das amostras com cura autógena e pré-molhagem dos agregados.....	152
Figura 48: Gráfico da área superficial das amostras com cura a 47% HR e pré-molhagem dos agregados.....	153
Figura 49: Gráfico da adsorção da mistura ARCN com as diferentes dimensões das partículas secas e na cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	154
Figura 50: Gráfico da adsorção da mistura ARCE com as diferentes dimensões das partículas secas e na cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	155
Figura 51: Gráfico da adsorção da mistura AL com as diferentes dimensões das partículas secas e na cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	157
Figura 52: Gráfico da adsorção da mistura ARCN com as diferentes dimensões das partículas secas e com cura a 47% HR. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	159
Figura 53: Gráfico da adsorção da mistura ARCE com as diferentes dimensões das partículas secas e com cura a 47% HR. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	160

Figura 54: Gráfico da adsorção da mistura AL com as diferentes dimensões das partículas secas e com cura a 47% HR, (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.	162
Figura 55: Gráfico da área superficial das amostras com cura a 47% HR e agregados secos	164
Figura 56: Gráfico da área superficial das amostras com cura a 47% HR dos agregados secos	164
Figura 57: Absorção por capilaridade da argamassa ARCN de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura autógena)	165
Figura 58: Absorção por capilaridade da argamassa ARCN de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura 47% HR).....	166
Figura 59: Absorção por capilaridade da argamassa ARCE de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura autógena)	166
Figura 60: Absorção por capilaridade da argamassa ARCE de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura 47% HR).....	167
Figura 61: Absorção por capilaridade da argamassa AL de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura autógena).....	167
Figura 62: Absorção por capilaridade da argamassa AL de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura 47% HR)	168
Figura 63: Absorção por capilaridade da argamassa ARCN de dimensões das partículas diferentes e secos (cura autógena)	169
Figura 64: Absorção por capilaridade da argamassa ARCN de dimensões das partículas diferentes e secos (cura 47% HR)	170
Figura 65: Absorção por capilaridade da argamassa ARCE de dimensões das partículas diferentes e secos (cura autógena)	170

Figura 66: Absorção por capilaridade da argamassa ARCE de dimensões das partículas diferentes e secos (cura 47% HR)	171
Figura 67: Absorção por capilaridade da argamassa AL de dimensões das partículas diferentes e secos (cura autógena)	171
Figura 68: Absorção por capilaridade da argamassa AL de dimensões das partículas diferentes e secos (cura 47% HR)	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos dados utilizados nas misturas de concreto e argamassas	49
Tabela 2: Resumo dos parâmetros utilizados em diferentes artigos.....	57
Tabela 3: Quadro-resumo dos resultados da retração.....	64
Tabela 4: Ensaios, métodos, quantidade de amostras e normas para argamassas estudadas	76
Tabela 5: Nomenclatura das argamassas	77
Tabela 6: Traço unitário para argamassas com agregados secos.....	80
Tabela 7: Traço unitário para argamassas com agregados pré-molhados	81
Tabela 8: Média da massa específica seca e SSS (picnômetro) e coeficiente de variação	93
Tabela 9: Resultados da absorção de água e porosidade dos agregados	94
Tabela 10: Resultado do flow (espalhamento) de cada mistura com agregados pré-molhados.....	96
Tabela 11: Resultado do flow (espalhamento) de cada mistura com agregados secos	98
Tabela 12: Resultados da massa específica e ar incorporado da argamassa no estado fresco com agregados molhados	99
Tabela 13: Resultados da massa específica e ar incorporado da argamassa no estado fresco com agregados secos	100
Tabela 14: Resistência à flexão das amostras com agregados pré-molhados.....	112
Tabela 15: Resistência à flexão das amostras com agregados secos ...	113
Tabela 16: Dados gerais para cálculo da ANOVA das amostras de resistência à compressão	114

Tabela 17: Comparação das médias (ANOVA) para os diferentes tipos de cura no ensaio de resistência à compressão 116

Tabela 18: Comparação das médias (ANOVA) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de resistência à compressão 118

Tabela 19: Comparação das médias (ANOVA) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de resistência à compressão 120

Tabela 20: Comparação das médias (ANOVA) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de resistência à compressão 122

Tabela 21: Quadro-resumo com a variação dimensional máxima de todas as misturas com agregados pré-molhados..... 129

Tabela 22: Quadro-resumo com a variação dimensional máxima de todas as misturas com agregados secos 135

Tabela 23: Dados utilizados para cálculo da ANOVA no ensaio de retração 137

Tabela 24: Comparação das médias (ANOVA) para os diferentes tipos de cura no ensaio de retração 139

Tabela 25: Comparação das médias (ANOVA) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de retração..... 140

Tabela 26: Comparação das médias (ANOVA) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de retração 142

Tabela 27: Comparação das médias (ANOVA) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de retração..... 143

Tabela 28: Valores da porosidade aberta das misturas com agregados pré-molhados 174

Tabela 29: Valores da porosidade aberta das misturas com agregados secos 175

Tabela 30: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para os diferentes tipos de cura no ensaio de resistência à compressão.....	191
Tabela 31: Comparação das médias (método de DUNCAN) para os diferentes tipos de cura no ensaio de resistência à compressão.....	192
Tabela 32: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de resistência à compressão	193
Tabela 33: Comparação das médias (método de DUNCAN) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de resistência à compressão	194
Tabela 34: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de resistência à compressão	195
Tabela 35: Comparação das médias (método de DUNCAN) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de resistência à compressão	196
Tabela 36: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de resistência à compressão	197
Tabela 37: Comparação das médias (método de DUNCAN) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de resistência à compressão .	198
Tabela 38: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para os diferentes tipos de cura no ensaio de retração	199
Tabela 39: Comparação das médias (método de DUNCAN) para os diferentes tipos de cura no ensaio de retração.....	200
Tabela 40: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de retração	201
Tabela 41: Comparação das médias (método de DUNCAN) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de retração	202

Tabela 42: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de retração	203
Tabela 43: Comparação das médias (método de DUNCAN) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de retração	204
Tabela 44: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de retração	205
Tabela 45: Comparação das médias (método de DUNCAN) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de retração	206

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ASTM	American Society for Testing Materials
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CI	Cura Interna
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DIP	Processamento de Imagem Digital
DMA	Agregado Reciclado de Entulho de Paredes
ESCSI	Expanded Shale, Clay and Slate Institute
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
LWA	Agregados Leves
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NA	Agregado Natural
RCA	Agregado Reciclado de Concreto
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
RFCA	Agregado Fino Reciclado de Concreto
RFMA	Agregado Fino Reciclado Misto

RH	Umidade Relativa
SSS	Superfície Saturada Seca
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ZTI	Zona de Transição Interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{\%}$	Absorção de água
m_s	Massa da amostra na condição superfície saturada seca
m	Massa da amostra seca em estufa
ρ_s	Massa específica aparente do material seco
V	Volume do frasco
V_a	Volume de água adicionada ao frasco
m_1	Massa do frasco com agregado
m_2	Massa do frasco
d_2	Massa específica aparente do material na superfície saturada seca
d	Massa específica da argamassa
m_c	Massa da argamassa mais recipiente cilíndrico
m_v	Massa do recipiente cilíndrico
V_r	Volume do recipiente cilíndrico
A_i	Ar incorporado da argamassa
d_t	Massa específica teórica da argamassa
R_f	Resistência à tração na flexão
F_f	Carga aplicada verticalmente no centro do prisma
L	Distância entre os suportes (comprimento prisma)

R_c	Resistência à compressão
F_c	Carga máxima aplicada
A	Área da seção
ε_i	Variação dimensional
L_i	Leitura inicial
L_0	Leitura efetuada após desforma
i	Idade de leitura
Δm_i	Variação da massa
m_i	Massa da amostra em cada idade
m_0	Massa inicial da amostra
S_e	Superfície específica
N_{AVG}	Número de avogrado
W_m	Conteúdo mássico
V_m	Volume molar do adsorvato (água)
A_m	Área de recobrimento de uma molécula adsorvida
C	Absorção de água por capilaridade
m_f	Massa do corpo-de-prova com uma das faces em contato com água
A_s	Área da seção transversal
X	Volume do líquido absorvido por área da seção transversal
S	Coefficiente de sorptividade

t	Tempo
m_{sat}	Massa da amostra saturada
I_v	Índice de vazios
m_{si}	Massa da amostra saturada imersa em água
ρ_{sat}	Massa específica saturada após fervura
ρ_r	Massa específica real da amostra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	35
1.1	JUSTIFICATIVA	37
1.2	OBJETIVOS	37
1.2.1	Objetivo Geral	37
1.2.2	Objetivo Específico.....	37
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
2.1	AGREGADOS POROSOS	39
2.1.1	Resíduos da construção e demolição (RCD)	39
2.1.2	Agregados leves artificiais.....	40
2.2	PROPRIEDADES DOS AGREGADOS POROSOS	41
2.2.1	Granulometria e dimensão das partículas.....	41
2.2.2	Massa específica	42
2.2.3	Absorção de água nos agregados	43
2.3	EFEITO DA PRÉ-MOLHAGEM E SECAGEM DOS AGREGADOS.....	45
2.4	REDE DE POROS E TRANSPORTE DE ÁGUA NA ARGAMASSA	50

2.5	PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	53
2.5.1	Trabalhabilidade	53
2.5.2	Massa específica aparente e teor de ar incorporado	54
2.6	PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO	54
2.6.1	Resistência Mecânica	54
2.6.2	Retração	58
2.6.2.1	<i>Retração autógena.....</i>	<i>60</i>
2.6.2.2	<i>Retração por secagem.....</i>	<i>62</i>
2.7	AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS AGREGADOS POROSOS NA MICROESTRUTURA	65
2.7.1	Adsorção e dessorção dos agregados	65
2.7.2	Absorção por capilaridade	70
2.8	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	72
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
3.1	MATERIAIS	75
3.1.1	Água	75
3.1.2	Cimento	75
3.1.3	Agregados	75

3.2	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	75
3.2.1	Etapa 1 – Caracterização dos materiais	76
3.2.1.1	<i>Composição Granulométrica</i>	76
3.2.1.2	<i>Massa específica e Massa específica do agregado na SSS</i>	77
3.2.1.3	<i>Absorção de água</i>	79
3.2.2	Etapa 2 – Caracterização das misturas	79
3.2.2.1	<i>Preparo das argamassas</i>	79
3.2.2.2	<i>Cura</i>	82
3.2.3	Etapa 3 – Comportamento no estado fresco da argamassa	82
3.2.3.1	<i>Trabalhabilidade</i>	82
3.2.3.2	<i>Massa específica aparente e teor de ar incorporado no estado fresco da argamassa</i>	82
3.2.4	Etapa 4 - Comportamento no estado endurecido da argamassa.....	83
3.2.4.1	<i>Resistência à compressão e resistência à tração na flexão</i>	83
3.2.4.2	<i>Retração.....</i>	84
3.2.5	Etapa 5 - Comportamento microestrutural da argamassa	86

3.2.5.1	<i>Isotermas de adsorção</i>	86
3.2.5.2	<i>Absorção por capilaridade</i>	89
3.2.5.3	<i>Porosidade aberta</i>	89
3.2.6	Análise Estatística	90
4	RESULTADOS	93
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	93
4.1.1	Massa Específica Seca e SSS	93
4.1.2	Absorção de água	94
4.2	propriedades da argamassa no estado fresco.....	95
4.2.1	Trabalhabilidade	96
4.2.2	Massa específica e ar incorporado	98
4.3	PROPRIEDADES DA ARGAMASSA O ESTADO ENDURECIDO	101
4.3.1	Resistência à compressão e resistência à flexão	101
4.3.2	Análise Estatística ANOVA – Resistência à compressão	113
4.3.2.1	<i>Tipos de Curas</i>	115
4.3.2.2	<i>Dimensões das partículas</i>	117
4.3.2.3	<i>Pré-molhagem ou secagem dos agregados</i>	119
4.3.2.4	<i>Tipos de agregados</i>	121

4.3.3	Retração	123
4.3.4	Análise Estatística ANOVA – Retração	136
4.3.4.1	<i>Tipos de Curas.....</i>	138
4.3.4.2	<i>Dimensões das partículas.....</i>	139
4.3.4.3	<i>Pré-molhagem ou secagem dos agregados.....</i>	141
4.3.4.4	<i>Tipos de agregados.....</i>	143
4.4	Propriedades da microestrutura da argamassa ...	144
4.4.1	Adsorção	144
4.4.2	Absorção por capilaridade.....	165
4.4.3	Porosidade aberta	173
5	DISCUSSÕES FINAIS.....	177
6	CONCLUSÕES.....	181
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	181
	REFERÊNCIAS.....	183
	ANEXOS	191

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização, que ocorreu de maneira acelerada em todo o mundo, ocasionou um consumo desenfreado dos recursos naturais e a conseqüente geração de resíduos. Estes resíduos são gerados principalmente pelo setor da construção civil, que há muitos anos vem sendo estudado para utilização em argamassas e concretos, incentivando assim, uma destinação adequada para os mesmos. O incentivo de preservar os recursos naturais e o meio ambiente, assim como, a conscientização das pessoas sobre a importância da reciclagem, vem crescendo nos últimos anos (MUÑON-RUIPEREZ et al., 2016).

Nos municípios do Brasil, foram coletados em 2015, 45 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição (RCD), esse número, comparado com o ano de 2014, apresentou aumentos de 1,2%. Tendo em vista que, a quantidade de produção desses resíduos é maior com o passar do tempo, deve-se ter uma atenção especial, principalmente, às coletas em municípios se destinarem a resíduos lançados ou abandonados em ruas públicas, não contabilizando assim o total produzido (ABRELPE, 2015).

Diante disso, vários autores estudam argamassas e concretos com RCD em substituição ao agregado natural, verificando o comportamento de suas propriedades físicas e químicas. Os agregados reciclados são conhecidos por ter uma densidade específica da partícula menor e uma absorção de água relativamente maior, se comparados com agregados naturais, devido principalmente a sua estrutura porosa. Estas propriedades das partículas dos agregados reciclados, podem resultar em propriedades da argamassa ou concreto com um menor desempenho, tanto no estado fresco como no endurecido. Desta maneira, procuram-se alternativas para melhorar as características destes agregados, através da pré-molhagem, de diferentes dimensões das partículas e porcentagens de substituições variadas (ZHAO et al., 2015; PICKEL; TIGHE; WEST, 2017; POON et al., 2004; CUENCA-MOYANO et al., 2014; CORINALDESI; MORICONI, 2009).

Seguindo a tendência mundial dos artigos internacionais, o grupo ValoRes da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) tem como principal objetivo estudar diversas alternativas para aproveitar e beneficiar os resíduos da construção e demolição. Pedrozo (2008) analisou a influência de agregados reciclados finos nas propriedades de argamassas e concretos. Jochem (2012) estudou argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD, em diferentes dimensões e com a molhagem prévia dos agregados, analisando a influência desse

material comparado a argamassas com agregados naturais. Morales (2015) também avaliou as propriedades das argamassas, utilizando apenas uma fração granulométrica do agregado reciclado em substituição do agregado natural e com molhagem prévia das partículas.

Um dos fatores negativos dos resíduos da construção e demolição é a baixa massa específica e a alta absorção de água, que causa baixas resistências à compressão e à flexão, quando são substituídas em 100% do agregado natural e com dimensões entre 0/4,8mm (ZHAO et al., 2015; CORINALDESI; MORICONI, 2009). Porém, Vegas et al. (2009) mostraram que é possível substituir agregado reciclado de concreto em até 25% sem diminuir as principais propriedades da argamassa; também, Jiménez et al. (2013) confirmaram que com uma substituição de agregado reciclado de cerâmica fina em até 40%, o desempenho manteve-se semelhante em resistência à compressão e flexão, comparados com argamassa referência (com agregado natural). Já Braga, Brito e Veiga (2012) mostraram que a incorporação de finos de agregado reciclado de concreto (<0,150 mm) em até 15%, aumentou a resistência à compressão em relação a argamassas com agregados naturais.

Em relação à pré-molhagem dos agregados porosos, alguns artigos concluíram que esta colaborou para a cura interna das argamassas e concretos, devido à liberação de água (contida nos poros dos agregados) acontecer até as idades mais avançadas de hidratação. Esta melhora faz com que as argamassas e concretos se tornem mais resistentes à deformações causadas pela retração (ELSHARIEF; COHEN; OLEK, 2005; BRAGA; BRITO; VEIGA, 2012; JIMÉNEZ et al., 2013).

Desta maneira, esta pesquisa pretende avaliar a substituição de 20% dos agregados naturais por agregados reciclados de construção e demolição e agregados leves, em cinco diferentes frações das partículas 0,15mm, 0,3mm, 0,6mm, 1,2mm e 2,4mm. Além de, condições de pré-molhagem do agregado reciclado e leve, utilizando uma relação água/cimento (a/c) de 0,5 no total e o cimento CP II – F. Buscou-se avaliar a contribuição da dimensão da partícula, da sua natureza, e na sua condição úmida ou seca, no comportamento da argamassa. No estado endurecido foram considerados dois tipos de cura destes sistemas: cura autógena e com umidade relativa de 47%, foi avaliado o efeito desta exposição na retração e no tipo de porosidade formada (isotermas de adsorção).

1.1 JUSTIFICATIVA

A justificativa do presente estudo é a reutilização de resíduos provenientes da construção civil, que são gerados em alta quantidade e sem destinação correta. Estes agregados devido a sua característica porosa, quando inseridos em substituição ao agregado natural em argamassas resultam em grande influência no comportamento mecânico destas. Para isso avaliou-se a substituição de diferentes partículas de agregados reciclados, identificando em qual delas a pré-molhagem pôde contribuir na eventual liberação de água para cura interna dos produtos, ou até mesmo prejudicar o comportamento mecânico, quando estes materiais estão expostos a situações de baixa e alta umidade relativa. Desta forma, buscou-se identificar em qual das dimensões das partículas de 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm, 1,2 mm e 2,4 mm contribui nas melhorias de produto e alterações da pasta.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o efeito da pré-molhagem de agregados reciclados nas propriedades mecânicas e na microestrutura de uma argamassa padrão.

1.2.2 Objetivo Específico

- Analisar a influência da adsorção de água dos agregados reciclados na hidratação e formação da microestrutura das argamassas por meio da rede capilar;
- Avaliar o efeito da cura autógena e na condição de 47% de umidade relativa das argamassas produzidas com agregados porosos (condição seca e de pré-molhagem) nas propriedades mecânicas e de microestrutura das argamassas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica abrangerá os principais assuntos ligados à presente dissertação, com o intuito de possibilitar ao leitor um melhor entendimento e inserção à pesquisa. Desta maneira, será discorrido o tema de agregados porosos inseridos em argamassas e concretos, as propriedades dos materiais utilizados e das misturas realizadas.

2.1 AGREGADOS POROSOS

2.1.1 Resíduos da construção e demolição (RCD)

Por meio da revisão de 114 publicações sobre reutilização de resíduos da construção civil em argamassas e concretos, pode se obter maiores informações sobre o comportamento destes materiais. Referindo-se à resistência à compressão, vários artigos, ao aumentar a porcentagem dos resíduos da construção e demolição (RCD) resultaram em concretos menos resistentes, porém, quando avaliadas argamassas, o efeito foi contrário. Além disso, o aumento do teor de finos de agregados reciclados, pode resultar em uma perda de resistência (SILVA, BRITO, DHIR, 2016).

A resolução nº 307 do CONAMA (2015), estabelece regras e procedimentos para a gestão do RCD, contribuindo para a diminuição dos impactos ambientais que são gerados por sua incorreta destinação. Além disso, com a reciclagem e reaproveitamento de resíduos da construção civil, surge um benefício social, técnico e econômico.

Ainda conforme a resolução nº 307 do CONAMA (2015), os RCD são classificados em quatro classes: Classe A – resíduos reutilizáveis ou reciclados como agregados, de construção, demolição, tanto para pavimentos como edificações, argamassas, concreto, entre outros; Classe B – resíduos destinados para outras aplicações, como, plásticos, papelão, gesso, entre outros; Classe C – resíduos que ainda não permitem a sua reciclagem e reutilização; Classe D – resíduos perigosos, tais como, tintas, óleos, solventes.

Segundo Zhao et al. (2015), frações muito finas de agregado reciclado (<0,63mm) em argamassas com relação a/c igual a 0,60 resultam em valores inferiores de massa específica no estado fresco (cerca de 4%) e na resistência à compressão e à flexão no estado endurecido (cerca de 21% e 8%, respectivamente), se comparadas às frações mais grossas de agregados naturais (até 4,8mm). Pode-se justificar devido ao agregado reciclado ter uma absorção de água de 7,54% enquanto o

agregado natural de apenas 1,05%, ou seja, sete vezes maior, diminuindo assim, a massa específica e a resistência mecânica das argamassas. Também, ao comparar diferentes dimensões das partículas dos agregados reciclados, dimensões das partículas entre 2,5 a 5 mm, resultaram em argamassas cerca de 18% mais resistentes à compressão e 13% em relação à resistência à flexão, em comparação a argamassas com agregados reciclados com dimensões das partículas entre 0 a 0,63 mm.

2.1.2 Agregados leves artificiais

Os agregados leves são caracterizados por terem uma alta porosidade e conseqüentemente baixa massa volumétrica. Existe uma grande diversidade de tipos de agregados leves, porém os mais utilizados em concretos estruturais são a argila expandida, xisto ou ardósia (SILVA, 2007).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), agregados com massa unitária menor do que 1120 kg/m^3 são considerados como agregados leves, e, esse baixo valor se deve à sua microestrutura celular ou alta porosidade. Estes agregados são classificados conforme a Figura 1, sendo que, nem todos podem ser utilizados na produção de concretos leves, como por exemplo, lascas de madeira, devido à baixa durabilidade no meio alcalino e úmido do concreto com cimento Portland.

Figura 1: Origem dos agregados leves.



Fonte: adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Ainda, quanto menor a massa unitária do agregado, menor a resistência à compressão do concreto, portanto agregados muito porosos

e com baixa massa unitária geralmente são frágeis e mais utilizados para concretos isolantes não estruturais. Já para agregados leves com uma maior massa unitária e com poros finos em menor quantidade e uniformemente distribuídos, as partículas dos agregados são mais resistentes e apropriadas para uso na produção de concretos estruturais, isolantes e para concretos de blocos de alvenaria (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS POROSOS

2.2.1 Granulometria e dimensão das partículas

A análise granulométrica dos agregados é a divisão da fração de partículas da mesma dimensão, através de uma série de peneiras empilhadas em ordem decrescente e vibradas por um tempo específico. Os agregados são separados em duas partes, onde a dimensão de 5mm ou a peneira ASTM N°4 estabelece a divisão entre agregados miúdos e agregados graúdos. Valores entre 0,06mm e 0,002mm são classificados como siltes e as partículas menores são chamadas de argilas (NEVILLE, 1997).

A NBR 7211 (2005) é similar à ASTM citada anteriormente, onde esta norma separa os agregados em miúdos e graúdos, sendo que o primeiro é classificado como as partículas que passam pela abertura da peneira de 4,75mm e ficam retidos na peneira 150 μ m e o segundo partículas que passam pela peneira de 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75mm. O material fino que passa pela peneira de 75 μ m é classificado como pulverulento, por exemplo, silte ou argila.

Braga, Brito e Veiga (2012) afirmam que a incorporação de finos de agregados reciclados de concreto (<0,150mm) na argamassa, preenchem os vazios, melhorando suas propriedades mecânicas através do efeito de enchimento (efeito *filler*), porém, um aumento na retração autógena é o efeito negativo que surgiu, cerca de 44% maior em relação à argamassa de agregado natural (as argamassas foram ensaiadas logo após a moldagem). As partículas finas das argamassas modificadas melhoraram a coesão interna da mistura, a trabalhabilidade e o desempenho mecânico, quando comparadas à argamassa de referência fabricada com areia natural.

Os agregados utilizados na composição das argamassas, em vários estudos, foram entulhos de concreto obtido através da britagem, agregado reciclado misto (concreto, tijolos e telhas), entulhos de paredes, agregado leve de argila expandida e para referência areia siliciosa, de quartzo e de

calcário, e sua dimensão máxima foi de 0/5mm (JIMÉNEZ et al., 2013; LEDESMA et al., 2014; CORINALDESI; MORICONI, 2009; THANG et al., 2016; SEO; CHOI, 2014). Zhao et al. (2015) testaram diferentes tamanhos dos agregados reciclados de concreto em condições secas de 0/0,63mm, 0,63/1,25mm, 1,25/2,5mm e 2,5/5mm e concluíram que a fração mais fina de 0/0,63mm prejudicou a trabalhabilidade e resistência mecânica, comparada com as frações maiores.

2.2.2 Massa específica

A massa específica pode ser classificada como absoluta ou relativa, sendo as duas referentes à relação entre a massa do material e o seu volume, porém, a absoluta não considera os vazios presentes no volume e a relativa (massa unitária) considera todos os vazios. A massa unitária é de suma importância para o cálculo de dosagem das argamassas, onde se pode converter o traço em massa para o traço em volume (mais utilizado em obra) (BAÍA; SABBATINI, 2008).

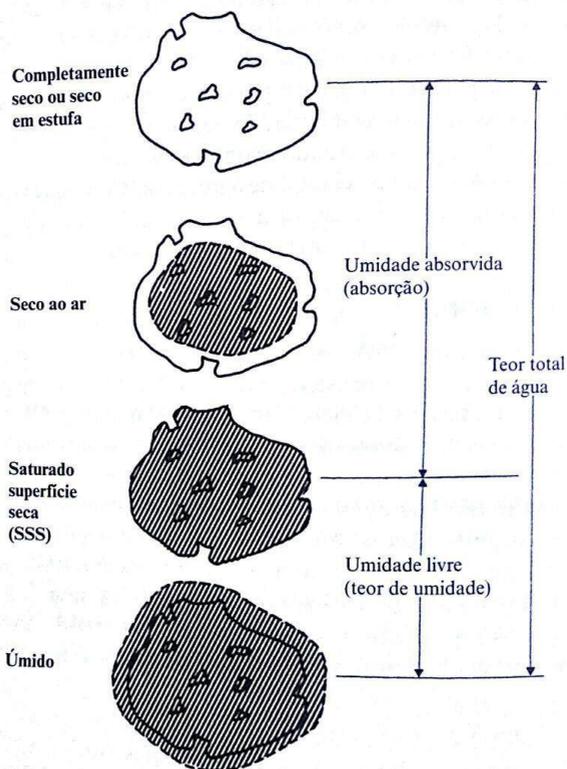
Através de uma revisão da literatura de 114 publicações Silva, Brito e Dhir (2016) selecionaram doze artigos para avaliar as propriedades da densidade no estado fresco das argamassas com uso de agregados reciclados. Na maioria dos estudos, o aumento da porcentagem de agregados reciclados (de concreto, de alvenaria e misto), resulta em menores densidades no estado fresco, devido principalmente a uma menor densidade dos agregados. Por exemplo, Cuenca-Moyano et al. (2014) estudaram agregados reciclados de concreto com densidade específica seca das partículas de 2,63 g/cm³ e agregados naturais de 2,82 g/cm³ e Jiménez et al. (2013), utilizaram agregado reciclado de paredes (tijolo cerâmico e argamassa de alvenaria) com densidade específica seca das partículas de 2,14 g/cm³, ambos os artigos resultaram em densidades no estado fresco menores para argamassas com agregado reciclado.

Conforme Nepomuceno e Silva (2014) a incorporação de agregado de argila expandida leve em argamassas, comparadas com argamassas fabricadas com agregados naturais, diminui a densidade à medida que o volume de agregados leves aumenta. Confirmando a citação acima, que a massa específica ou unitária do material, tem influência na densidade das argamassas, em virtude da maior quantidade de poros no agregado leve ou reciclado comparado ao agregado natural.

2.2.3 Absorção de água nos agregados

Em diferentes tipos de agregados pode-se encontrar vários graus de saturação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A Figura 2 mostra quatro condições de umidade dos agregados: quando o agregado é levado à estufa à 105° C e toda água for eliminada pelo aquecimento; caso o agregado seja exposto ao ar e parte de sua água evapora; em condição de superfície saturada seca (SSS) quando os poros permeáveis estão saturados e sua superfície se encontra seca; e úmido, quando o agregado está saturado e em sua superfície ainda se encontra umidade.

Figura 2: Condições de umidade das partículas do agregado



Fonte: Neville e Brooks (2013).

A absorção de água pode ser definida como a diferença de massa entre uma amostra com superfície saturada seca (SSS) e seca em estufa à 105° C por 24 horas. Essa quantidade de massa perdida quando o agregado é levado à estufa é a porcentagem de absorção de água existente no agregado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Pickel, Tighe e West (2017) realizaram o ensaio de absorção de água de acordo com a norma do Canadá a qual se assemelha à NBR NM 30 (2001) utilizada no presente estudo. Encontrando a massa inicial seca, a massa na superfície saturada seca e a massa seca em estufa por 24 horas em estufa à 105° C, pode-se calcular a quantidade de água absorvida pelos agregados naturais, agregados reciclados de concreto não estrutural e agregados reciclados de concreto produzido em usina, sendo os respectivos resultados de 1,53%, 4,72% e 6,91%. Para realização das misturas estudadas, os autores saturaram os agregados em um nível de aproximadamente 100%, isto porque, entende-se que a água presente nos agregados, após o começo da cura, migra para a mistura de acordo com a quantidade de umidade que existe no concreto, afetando a relação água/cimento (a/c) e resultando em uma resistência à compressão maior em condições de curas menores, ou seja, que não estejam em um ambiente com 100% de umidade relativa.

Alguns artigos empregaram a norma UNE-EN 1097-6 para determinar a absorção da água nos agregados. Estes agregados são saturados em água durante 24 horas e após esse período mede-se o teor de água na superfície saturada seca (SSS) através do ensaio da queda do cone. A SSS é encontrada deixando a amostra exposta a uma corrente de ar quente para que a umidade presente em sua superfície evapore, o agregado é então adicionado ao cone de metal e depois levanta-se o cone verificando se a amostra mantém a forma cônica, caso não se mantenha, o agregado chegou à SSS e assim, anota-se sua massa. Em seguida seca-se a amostra em uma estufa a 105° C, obtendo-se a massa seca. Com estes valores pode-se calcular o coeficiente de absorção dos agregados (SIDOROVA et al., 2014; ZHAO et al., 2015; NEPOMUCEMO; SILVA, 2014; MARTÍNEZ et al., 2016; LEDESMA et al., 2014; CORINALDESI, 2009; THANG et al., 2016). Outros autores utilizaram a ASTM C128 onde a absorção da água é calculada através da Equação 1 (CASTRO et al., 2011; ELSHARIEF; COHEN; OLEK, 2005; SHEN et al., 2015):

$$A_{\%} = \left[\frac{(m_s - m)}{m} \right] \times 100 \quad (1)$$

Onde:

m_s = massa da superfície saturada seca – massa seca, g.

m = massa seca em estufa em 105 ± 5 °C durante 24 horas ou até a consistência da massa - massa da amostra seca ao ar, g.

2.3 EFEITO DA PRÉ-MOLHAGEM E SECAGEM DOS AGREGADOS

Nos últimos anos o uso de agregados reciclados e agregados leves em substituição aos agregados naturais vem sendo uma alternativa para reciclar e não dispor esses materiais (muitas vezes poluentes) em aterros que prejudiquem a natureza. No entanto, estes materiais nem sempre resultam em concretos ou argamassas resistentes e duráveis, sendo importante, realizar estudos que melhorem suas propriedades para permitir o seu uso, como por exemplo, a pré-molhagem dos agregados.

Pickel, Tighe e West (2017) pesquisaram concreto com dois tipos de agregados graúdos reciclados de concreto (RCA), sendo um proveniente de concreto estrutural e outro de concreto produzido em usina, ambos foram pré-molhados, confirmando que a água reservada nos poros dos agregados quando liberada no processo de hidratação, traz muitos benefícios, principalmente quando a cura externa é fraca. A condição de saturação a 100% foi atingida após imersão dos agregados em água por um período de 24 horas, definida através de outras pesquisas em que a saturação completa do material foi certificada. Os reservatórios de água no interior da mistura ajudam na cura interna (CI) dos concretos e argamassas, que, tornam-se mais eficazes ao longo da hidratação, devido a esta água adicional resultar em uma hidratação mais completa. As amostras foram mantidas em ambiente a 100% de umidade relativa e 24° C para realização da cura.

Ainda, um dos principais ensaios utilizados pelos autores para avaliar se a pré-molhagem ajudou na CI do concreto, foi o de dessorção dos materiais conforme a norma ASTM C1498, através de soluções de sal saturado criando ambientes que apresentassem níveis diferentes de umidade relativa, anotando a perda de massa. O que pôde ser concluído com os resultados obtidos dos agregados reciclados, foi que, ambos retêm cerca de 95% da água percolada em um ambiente com umidade relativa a 93%, não dessorvendo uma quantidade de água tão grande, a qual seria necessária para a CI.

Outro estudo utilizou três estados de umidade dos agregados reciclados de concreto armado e agregados naturais de granito: secos ao ar, secos em estufa à 105° C e superfície saturada seca, todos os estados

de umidade foram alcançados após um período de 24 horas. As amostras foram curadas em água a 27° C em 7, 14 e 28 dias. Os resultados encontrados quando o agregado natural foi substituído pelos agregados reciclados secos ao ar no concreto, em relação à trabalhabilidade e à resistência à compressão foram, praticamente, iguais comparados aos valores obtidos com agregados naturais. Isso já não pode ser confirmado quando o agregado reciclado estava na condição de superfície saturada seca e secos em estufa, pois devido à alta absorção de 7,56%, seis vezes maior que a do agregado natural, resultou em trabalhabilidade e resistência à compressão menor, se comparadas a concretos com agregado natural (POON et al., 2004).

Em concretos ou argamassas confeccionadas com agregados leves de xisto expandido e argila expandida, houve uma quantidade maior de estudos na pré-molhagem e secagem. O grande número de poros existentes nesses agregados fez com que ocorresse uma melhoria na zona de transição interfacial da pasta, independente do agregado estar pré-molhado ou seco. Quando o agregado se encontra seco na realização da mistura, parte da água utilizada migra para os seus poros e é liberada durante o processo de hidratação, já com agregados pré-molhados, pode-se utilizar uma menor relação a/c, pois a água contida no agregado vai ser liberada no início da mistura até o começo da hidratação. Esta pré-molhagem ou secagem dos agregados leves é realizada em um período de 24 horas (BENTZ, 2009; SHEN et al., 2017; ELSHARIEF; COHEN; OLEK, 2005).

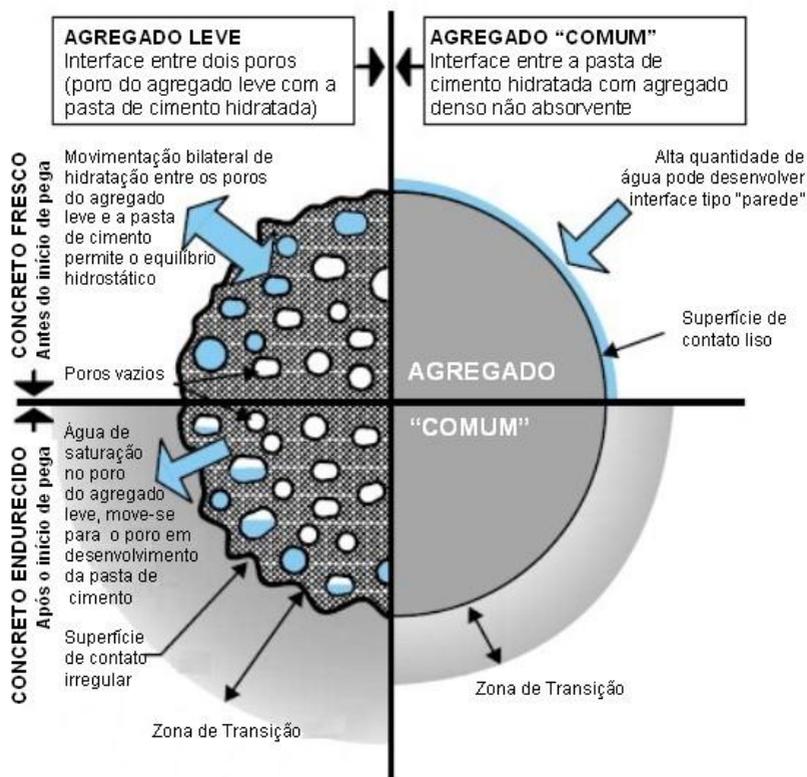
Ainda, a natureza do agregado influencia a microestrutura entre a pasta de cimento e o agregado, devido a sua porosidade e capacidade de absorção de água. Os agregados porosos podem resultar em uma microestrutura com zona de transição mais densa por absorver água em seu interior e ao longo da hidratação da pasta liberá-la para a mistura, proporcionando uma melhoria na cura interna (CI). Essa melhoria pode causar reduções na retração autógena (BENTZ, 2009; BENTZ et al., 2009; VARGAS; RESTREPO-BAENA; TOBÓN, 2017).

Outro aspecto do agregado leve ou poroso que interfere na eficácia da cura interna é o tamanho da partícula e a textura. Com um mesmo volume de água presente na cura interna, partículas com tamanhos menores têm uma distância entre pasta e agregado menor, essa proximidade faz com que a água, que percorre uma distância limitada na mistura, origine uma maior quantidade de pasta protegida (GOLIAS; CASTRO; WEISS, 2012).

A Figura 3 ilustra, detalhadamente, a ligação entre a pasta de cimento hidratada com o agregado leve e o com agregado comum, no

concreto em estado fresco e endurecido. Antes do início da pega o agregado leve exerce uma constante troca de água entre os poros e a pasta de cimento, permitindo assim, um equilíbrio hidrostático. Já no agregado comum, uma alta quantidade de água chega à superfície do agregado podendo causar uma interface ou “parede”. No estado endurecido, após o início da pega, a água presente nos poros do agregado leve migra para o poro em desenvolvimento da pasta de cimento e resulta em uma zona de transição maior, comparada à do agregado comum (ESCSI, 2006).

Figura 3: Agregado leve e comum e sua influência na zona de transição



Fonte: ESCSI, (2006).

O efeito da pré-molhagem em agregados leves e reciclados (xisto expandido, agregado de concreto reciclado, argila expandida de forno rotativo, entre outros), vem sendo pauta de muitos estudos,

principalmente em concreto de alto desempenho (CAD), devido à baixa relação a/c utilizada para sua composição. Estes agregados saturados ajudam na cura interna do concreto fornecendo água durante a hidratação da pasta, principalmente, nas primeiras idades, diminuindo assim, o risco de fissuras (HENKENSIEFKEN et al., 2009; PICKEL, TIGHE; WEST, 2017; SHEN et al., 2015).

Estes três artigos citados na Tabela 1 foram selecionados, pois apresentam análises da zona de transição interfacial (ZTI) em diferentes agregados porosos, pré-molhados ou não, em concreto e argamassas e com diferentes relações a/c. Sendo possível assim, avaliar mais amplamente o efeito desses parâmetros em situações distintas.

Segundo Vargas, Restrepo-baena e Tobón (2017) o agregado leve de pedra-pome (seco) no concreto convencional resultou em uma ZTI mais densa (menor porosidade e maiores fases hidratadas) e fina com espessura de aproximadamente 50,6 µm para uma relação a/c de 0,35. Já o agregado leve de Aliven e natural (secos) obtiveram maior espessura de 59,2µm e 65,7µm respectivamente, para uma relação a/c de 0,35, concluindo que a angularidade que o agregado leve de pedra-pome apresenta e sua superfície porosa melhora a microestrutura da ZTI. Além disso, a espessura de ZTI aumentou conforme aumentava a relação a/c (0,35 a 0,45), tanto para concretos com agregados leves quanto para convencionais, mostrando a importância do estudo da quantidade de água ideal para a mistura. Estes dados foram obtidos através dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica convencional para encontrar a espessura do agregado leve, e processamento de imagem digital (DIP) para determinar sua porosidade.

Henkensiefken et al. (2009) realizaram a pré-molhagem dos agregados usando em média as mesmas relações a/c que o estudo anterior, no entanto, essa água adicional, que não está incluída no volume total fez com que a hidratação continuasse a acontecer. A água no agregado leve saturado foi extraída pela pasta de cimento em hidratação para preencher os vazios dentro da porosidade capilar criada pela retração química, resultando em uma maior hidratação. Este estudo também concluiu que quanto maior a relação a/c maior o seu grau de hidratação. A mistura de areia de rio com relação a/c de 0,3 comparada com a mistura de 11% de folhelho expandido com uma mesma relação a/c resulta em um menor grau de hidratação, isso acontece, pois, o agregado leve absorve uma maior quantidade de água na sua pré-molhagem, permitindo assim fornecer água extra à mistura. Devido à baixa relação água/cimento, foi utilizado um aditivo redutor de água para que a argamassa se tornasse mais trabalhável, homogênea e coesa, além de possibilitar uma melhor

resistência mecânica, maior durabilidade e diminuição de retração e fissurações na argamassa.

Tabela 1: Resumo dos dados utilizados nas misturas de concreto e argamassas

Publicação	Tipo de cimento	Consumo de cimento (kg/m ³)	Agregado Miúdo	Porcentagens de substituição (%)	Consumo (kg/m ³)	Agregado Graúdo	Consumo (kg/m ³)	Relação a/c
VARGAS; RESTREPO- BAENA; TOBÓN, 2017	Cimento Portland tipo I	500	Agregado leve Aliven	100	400			
			Agregado leve pedra-pome	100	400	-	-	0,35 - 0,45
			Agregado convencional	100	400			
HENKENSIEF KEN et al., 2009	Cimento Portland tipo I	1761	-	0	-			0,25
		1619	-	0	-			0,3
		1498	-	0	-			0,35
		1393	-	0	-			0,4
		793	Areia de rio	100	1418			0,25
		728	Areia de rio	100	1418			0,3
		674	Areia de rio	100	1418			0,35
		728	Areia de rio Folhelho expandido	89	1135			0,3
				11	172			
		728	Areia de rio Folhelho expandido	76,3	808			0,3
		23,7	369					
POON; SHUI; LAM, 2004	Cimento Portland Comum	379	Areia de rio	-	623	Granito	1237	0,5
		379	Areia de rio	-	590	Agregado reciclado concreto	1171	0,5
		379	Areia de rio	-	590	Agregado reciclado (HPC)	1171	0,5

Ainda, conforme os autores Henkensiefken et al. (2009), a adição de um agregado leve como um agente de cura interna apresentou uma microestrutura mais densa na ZTI, resultando em menos absorção de água, menor sorptividade e condutividade elétrica nas amostras. A mistura com 23,7% de agregado leve e relação a/c de 0,3 reduz em 46% a sorptividade inicial e 28% a secundária e a condutividade em 53% comparada com a argamassa convencional de a/c 0,25.

Poon et al. (2004) estudaram a ZTI de concretos confeccionados com agregado reciclado de concreto e agregado reciclado de concreto de alto desempenho (CAD) em comparação ao convencional. O que pode ser observado entre a matriz de cimento e o agregado reciclado de concreto foi uma ZTI porosa e solta enquanto entre a matriz de cimento e o agregado reciclado CAD a ZTI se encontrava densa, estas análises foram realizadas através do MEV. Esta ZTI mais densa no concreto com agregado reciclado CAD pode ser justificada pelo agregado absorver na mistura parte da água utilizada, baixando a relação a/c inicial e liberando essa água nas primeiras idades de hidratação, melhorando a ligação interfacial entre o agregado e o cimento.

Com estas análises pode-se confirmar que o grau de hidratação, o tamanho da ZTI e a absorção de água, tanto da argamassa quanto do concreto, são influenciados pelo tipo de agregado utilizado e pela pré-molhagem ou secagem dos agregados. Agregados mais porosos na hidratação da pasta fazem com que a mesma não sofra tantas fissuras nas primeiras e mais avançadas idades. A pré-molhagem dos agregados permite utilizar relações a/c mais baixas, pois a água presente em seus poros é liberada no começo da mistura até as idades mais avançadas da hidratação, melhorando assim, a ligação interfacial entre o agregado e a pasta.

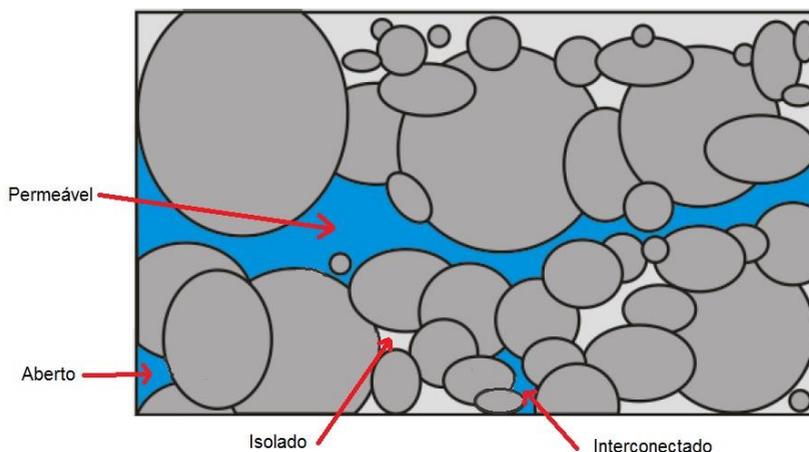
2.4 REDE DE POROS E TRANSPORTE DE ÁGUA NA ARGAMASSA

A maioria dos materiais de construção civil podem ser considerados porosos, dentre eles, os materiais cimentícios se destacam por possuírem redes porosas complexas e tortuosas. Esta porosidade é resultado do processo de hidratação do cimento, que acaba não preenchendo todos os espaços vazios com produtos de hidratação, formando poros que muitas vezes estão conectados entre si (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Estes espaços vazios podem estar preenchidos por ar ou água, dependendo da condição de saturação, e desta forma são criadas as interfaces entre sólido, líquido e gás.

Os poros podem ser classificados de diversas maneiras, principalmente pelas suas dimensões, conforme apresentado pela IUPAC (1982) em microporos ($\text{Ø} < 2\text{nm}$), mesoporos ($2\text{nm} > \text{Ø} < 50\text{nm}$) e macroporos ($\text{Ø} > 50\text{nm}$), além do formato e da conectividade entre vazios (BERNARDES, 2013). Estes poros, podem estar isolados uns dos outros, ou interligados, formando uma rede de poros onde é possível o transporte de matéria entre os vazios, como por exemplo água ou vapor. Desta

forma, os poros podem ser classificados em quatro diferentes tipos, conforme representado na Figura 4.

Figura 4: Tipos de poros de uma matriz cimentícia



Fonte: adaptado de SENTONE, 2011.

Os poros fechados ou isolados, estão contidos no interior da matriz e não estão em contato com nenhum outro poro da estrutura, assim como os poros abertos, que estão em contato com o meio externo, porém não estão em contato com nenhum outro poro, logo estes não contribuem para o transporte de matéria através da rede porosa. Os poros interconectados apresentam ligação com o meio externo e com outros poros no interior da matriz, formando uma espécie de caminho que, no entanto, não chega a atravessar o material de uma face à outra como os poros permeáveis, que são poros interconectados cuja rede de interconexões atravessa o material de uma face à outra (SENTONE, 2011). Estes dois tipos de poros contribuem diretamente para o transporte de massa no interior do material.

O estudo da porosidade dos materiais cimentícios determina principalmente a porosidade total do material e a parcela destes poros que está interconectada. A porosidade fechada pode ser determinada pela diferença entre a porosidade total e a porosidade aberta e só pode ser estudada através de microscopia. Já a porosidade aberta, pode ser determinada por absorção de água ou por intrusão de mercúrio, a qual

ainda permite determinar a distribuição das dimensões dos poros (THOMSON et al, 2004).

Além disso, a distribuição das dimensões dos poros pode ser definida por técnica de adsorção de vapor de água ou nitrogênio, que determinam a superfície específica da rede de poros. A superfície específica pode ser definida como a área de superfície que pode ser acessada e que está contida na massa do sólido. Quanto maior seu valor, mais refinada é a rede de poros. (BAROGHEL-BOUNI, 1994 apud SALOMÃO, 2016). A técnica de adsorção de vapor de água é bastante simples e se baseia na associação de um grau de saturação com a dimensão dos poros através da lei de Kelvin, sendo muito eficiente para estudos comparativos.

O tamanho médio dos poros de uma matriz cimentícia é alterado dependendo de parâmetros como relação a/c, teor de agregados e idade de cura. A relação água/cimento influencia na distância entre as partículas de cimento, sendo que, para relações a/c mais baixas há uma maior proximidade entre as partículas e conseqüentemente uma maior densificação da matriz pelo preenchimento dos espaços livres com produtos de hidratação. Já em relação à idade de cura dos materiais, com o passar do tempo ocorre o refinamento dos poros por consequência da contínua hidratação das partículas de cimento ao longo do tempo, resultando no preenchimento dos espaços livres entre partículas por produtos de hidratação, reduzindo significativamente o tamanho médio dos poros (COOK e HOVER, 1999).

Quanto à relação entre cimento/agregados, estudos de SILVA et al. (2015) mostraram que o diâmetro médio dos poros de uma argamassa de traço 1:3 (cimento:agregados) em volume, é em torno de 0,3 μm , sendo que, ao alterar o traço para 1:6, o diâmetro médio foi elevado para 2 μm . Isso se deve ao fato de a interface pasta/agregado ser uma região bastante suscetível à formação de poros, principalmente pelo aprisionamento de ar entre os grãos e também pelo efeito parede do agregado. Desta forma, quanto maior for a quantidade de agregado de uma argamassa, maior será a área de interface pasta/agregado e conseqüentemente maior será a porosidade e maior será o diâmetro destes poros (ARANDIGOYEN & ALVAREZ, 2007).

2.5 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

2.5.1 Trabalhabilidade

Baía e Sabbatini (2008) denominam uma argamassa como trabalhável quando a mesma se mantém coesa até sua aplicação, se distribui facilmente e não endurece rapidamente quando aplicada. Mehta e Monteiro (2014) complementam que uma mistura de concreto com difícil lançamento e adensamento prejudica nos custos e nas propriedades de resistência e durabilidade. A trabalhabilidade é composta por dois componentes principais no estado fresco do concreto ou da argamassa, a consistência e a coesão. A consistência é definida como uma medida de umidade avaliada em termos de abatimento, ou seja, quanto maior a umidade presente no concreto maior será seu abatimento. A coesão, por sua vez, é avaliada através do alisamento da superfície da argamassa e por sua resistência à segregação.

A trabalhabilidade é afetada por vários fatores, sendo eles a quantidade de água presente na mistura, o tipo de agregado e sua granulometria, relação agregado/cimento, presença de aditivos e finura do cimento. O principal fator é o teor de água presente na mistura, visto que a quantidade de água aumenta a lubrificação entre as partículas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A norma europeia EN 1015-3 (1999) mede a consistência da argamassa pelo espalhamento. O parâmetro definido para a consistência a ser atingida foi de acordo com o padrão de 175 ± 10 mm de abertura (BRAGA; BRITO; VEIGA, 2012; MUÑOZ-RUIPEREZ et al., 2016), porém, outro estudo utilizando a mesma norma estabeleceu uma abertura de 120 ± 10 mm (CORINALDESI., 2009).

Braga, Brito e Veiga (2012) fabricaram argamassas com 5%, 10% e 15% de incorporação de finos de agregado reciclado de concreto com diâmetro $<0,150$ mm. Com o aumento da proporção, ou seja, os 15% de finos de agregado reciclado de concreto diminuíram a água necessária na mistura para atingir a consistência determinada anteriormente. Isto ocorreu pelo agregado reciclado muito fino preencher os vazios da argamassa que estavam cheios de água, chamado efeito de enchimento. Estas partículas muito finas melhoraram a trabalhabilidade e a coesão interna da mistura.

Corinaldesi (2009) utilizou argamassas com agregado reciclado (72% de agregados de concreto, 25% telhas e tijolos e 3% variados em asfalto, vidro, papel entre outros) em comparação com agregados naturais

(areia de quartzo) com tamanho máximo da partícula de ambos os agregados de 6mm. Para que atingissem o mesmo valor de consistência, a argamassa com agregado fino reciclado teve uma maior dosagem de água na mistura em comparação à argamassa com areia de quartzo. Essa maior quantidade de água pode-se explicar pelo agregado reciclado ter uma absorção de água superior ao natural. Pode-se confirmar assim que a forma, o tamanho e a origem do agregado têm influência nas propriedades da argamassa.

2.5.2 Massa específica aparente e teor de ar incorporado

A massa específica é obtida pela pesagem do material em um recipiente onde se conhece o seu volume e sua massa (NEVILLE; BROOKS, 2013). O teor de ar é definido como o ar existente em um determinado volume da argamassa. À medida que esse teor cresce a massa específica diminuiu, sendo que esse aumento pode prejudicar a resistência mecânica e a aderência da argamassa (BAÍA; SABBATINI, 2008).

Martínez et al. (2016) empregaram três tipos de agregados reciclados para confecção de argamassas: agregado reciclado de cerâmica, agregado reciclado misto e agregado reciclado de concreto, ambos com tamanho das partículas entre 0,063mm e 4mm. Os agregados reciclados foram utilizados em três porcentagens de 50%, 75% e 100% em substituição à areia natural, e em todas as misturas, foi incorporado 1% de aditivo para reduzir o teor de água da argamassa, para manter a trabalhabilidade e melhorar suas propriedades. A densidade da argamassa no estado fresco diminuiu conforme aumentava o grau de porcentagem de agregado reciclado na mistura, por exemplo, 2,31 g/cm³ na argamassa referência e com 100% de qualquer agregado reciclado variou de 2,08 g/cm³ à 2,13 g/cm³. Isso pode ser explicado pela massa específica dos agregados reciclados serem relativamente menores que a do agregado natural. Estes resultados foram semelhantes aos encontrados pelos autores Zhao et al. (2015).

2.6 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

2.6.1 Resistência Mecânica

Mehta e Monteiro (2014) definem a resistência mecânica como a capacidade de resistir à tensão sem que haja o rompimento. Apesar da relação a/c ser um dos fatores mais importantes para controlar a

porosidade da matriz, a sua zona de transição interfacial e, conseqüentemente, sua resistência mecânica, a cura interna, o adensamento, as características dos agregados, aditivos, condições do corpo-de-prova moldado, entre outros, resultam em efeitos importantes para se obter uma resistência melhorada destes concretos e argamassas.

Os testes de resistência mecânica foram seguidos de acordo com a EN 196-1, onde determinou-se as resistências à flexão e à compressão da argamassa endurecida com amostras de 40mm x 40mm x 40mm depois de ter sido curadas 28 dias em água. Esta norma foi empregada por ZHAO et al. (2015) e Yacine, Ratiba e Abderrahmane (2016). Outros autores utilizaram a norma EN 1015 – 1011 para avaliar as resistências à flexão e à compressão com amostras prismáticas (40 x 40 x 160mm), curadas a 20° C até os 28 dias (CORINALDESI, 2009; CUENCA-MOYANO et al., 2014; BRAGA; BRITO; VEIGA, 2012; JÍMENEZ et al., 2013).

Zhao et al. (2015) estudaram vários fatores que interferem nas propriedades das argamassas, como, relação a/c, diferentes porcentagens de substituições do agregado fino reciclado de concreto (0/0,63mm, 0,63/1,25mm, 1,25/2,5mm e 2,5/5mm) e agregado natural de calcário e o grau de pré-molhagem e dimensão dos agregados empregados na mistura. Para que houvesse uma melhor análise, as argamassas fabricadas foram divididas em três séries.

A primeira série variou a relação a/c em 0,5, 0,55 e 0,6 e o grau de pré-molhagem total dos agregados, utilizando argamassa referência de areia natural e argamassas com substituições de 100% de agregado fino reciclado de concreto (RFCA). Em relação às resistências à flexão e à compressão, com o mesmo volume de agregados e qualquer que fosse o grau de pré-molhagem, as argamassas com RFCA resultaram em resistências mais baixas que argamassas referências. Comparando argamassas com agregados secos ou pré-molhados, os secos obtiveram resultados superiores na resistência à compressão, enquanto que na resistência à flexão os valores são quase os mesmos, independente do agregado e da pré-molhagem.

A segunda série utilizou diferentes porcentagens de RFCA as quais são apresentadas na Tabela 3 junto com os parâmetros utilizados no artigo. Na qual pode-se concluir que o aumento da porcentagem de substituição da areia natural pelo RFCA tanto a resistência à compressão, como à flexão obtiveram resultados inferiores. A terceira série analisou a influência das diferentes frações granulares da areia reciclada nas argamassas (0/0,63mm, 0,63/1,25mm, 1,25/2,5mm e 2,5/5mm), utilizando a mesma relação a/c. Com esses resultados também conclui-se que argamassas com areia reciclada têm um menor desempenho que a

argamassa referência. Para as diferentes frações granulares a que teve maior influência negativa nas resistências mecânicas foi a fração mais fina de 0/0,63mm (ZHAO et al., 2015).

A Tabela 2 apresenta os dados das misturas utilizadas em três artigos que realizaram o ensaio de resistência mecânica em argamassas. Estes estudos serão comentados brevemente posteriormente.

Corinaldesi (2009) estudou argamassas referência de agregado natural de quartzo (NA) em comparação a argamassas de agregado fino reciclado misto (RFMA), com relação a/c maior para os RFMA devido a sua maior absorção de água. Nos testes de resistência à compressão e à flexão foram rompidas as argamassas nas idades de 3, 7 e 28 dias, onde, em ambas as idades a argamassa com RFMA obteve resultados inferiores, cerca de 50% menos em relação à referência. Estes resultados inferiores são principalmente devido a menor densidade específica do RFMA de 2150 kg/m³ em relação à do NA de 2620 kg/m³ e a sua maior absorção de água, de 10% no RFMA e 3% no NA.

Já Jiménez et al. (2013) usaram como agregado reciclado resíduos finos de cerâmica em cinco proporções diferentes, em substituição ao agregado natural (0%, 5%, 10%, 20% e 40%), avaliando a resistência à compressão e flexão dessas argamassas. Com consumo de cimento igual em todas as misturas e variando a água conforme a consistência das argamassas em estado fresco, os valores mais baixos de resistência foram os da argamassa referência, sendo que, a utilização de até 40% de agregado reciclado de cerâmica, melhorou as propriedades mecânicas das argamassas. Este aumento pode ser explicado pelo efeito pozolâmico das partículas de cerâmica (tijolo) que provocavam um efeito de enchimento nos vazios da argamassa. Ainda, foi utilizado neste estudo um aditivo introdutor de ar (RHEOMIX 550), para que haja uma melhora na trabalhabilidade, redução na absorção capilar e menor risco de fissuras.

Tabela 2: Resumo dos parâmetros utilizados em diferentes artigos

Publicação	Tipo de cimento	Consumo de cimento	Tipo Agregado Miúdo	Porcentagens de substituição (%)	Consumo	Relação a/c
(ZHAO et al., 2015)	Cimento Portland (CEM I 52,5 "Superblanc")	450g	Agregado reciclado fino de concreto (FRCA)	0	0	0,5
			Areia natural calcário (NA)	100	1350g	
		450g	FRCA	10	129,1g	0,5
			NA	90	1215g	
		450g	FRCA	20	258,2g	0,5
			NA	80	1080g	
		450g	FRCA	30	387,3g	0,5
			NA	70	944,9g	
		450g	FRCA	50	645,6g	0,5
			NA	50	675g	
450g	FRCA	100	1291,1g	0,5		
	NA	0	0			
(JIMÉNEZ et al., 2013)	Cimento CEM IV/A (V) 32,5 N	566g	Agregado reciclado fino de cerâmica (DMA)	0	0	0,94
			Areia natural siliciosa (NA)	100	3682g	
		566g	DMA	5	149,8g	0,96
			NA	95	3497,9g	
		566g	DMA	10	299,6g	0,98
			NA	90	3312,8g	
		566g	DMA	20	599,2g	1,05
			NA	80	2945,6g	
		566g	DMA	40	1198,4g	1,13
			NA	60	2209,2g	
(CORINALDES I, 2009)	Cimento Portland Calcário tipo CEM II/A-L 42,5 R	450 kg/m ³	Areia de quartzo	100	1350kg/m ³	0,52
		450 kg/m ³	Agregado reciclado fino misto	100	1350kg/m ³	0,71

Através destes artigos, pode-se concluir que o tipo de agregado, junto com a sua dimensão e seu grau de molhagem, a relação a/c e o consumo de cimento, têm influência direta nas propriedades da

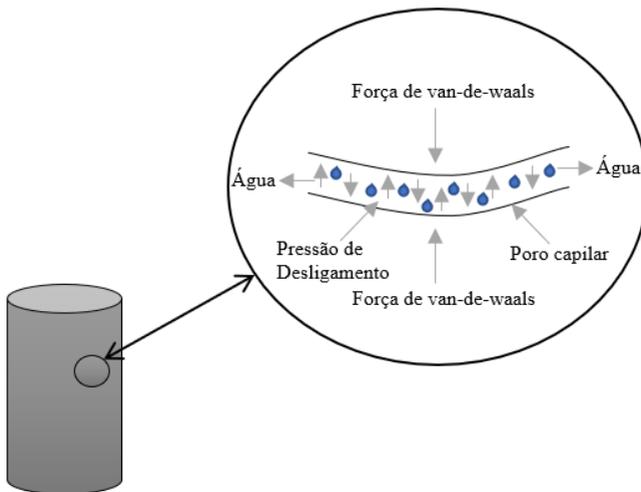
argamassa. Estes parâmetros podem melhorar o desempenho das argamassas em relação a sua durabilidade e resistência mecânica.

2.6.2 Retração

O estudo e o entendimento das variações dimensionais de argamassas e concretos é de grande relevância por estar diretamente vinculado à qualidade e durabilidade das edificações. Quando esses materiais são aplicados sobre uma base, estão sujeitos a fenômenos de retração e expansão, que podem originar fissuras (BASTOS; NAKAKURA; CINCOTTO, 2005), comprometendo a vida útil das estruturas.

Estes fenômenos ocorrem através da variação do volume da pasta ao longo do tempo, gerando expansões ou retrações nas argamassas, que são provocadas pelo transporte e/ou perda de água do material, tanto no estado fresco como no estado endurecido. A variação dimensional ocorre sem influência de cargas externas, como pode ser observado na Figura 5, onde as forças de van-der-waals fazem com que a água percole na argamassa (NUNES; FIGUEIREDO, 2007).

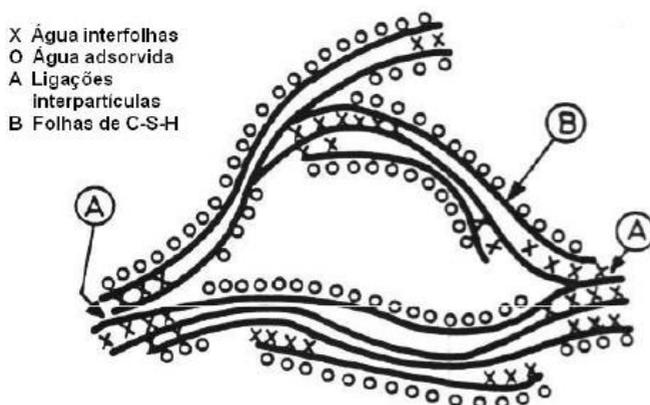
Figura 5: Transporte de água devido à hidratação do cimento conforme mecanismo proposto por Feldman e Sereda (1970)



Fonte: adaptado de Feldman e Sereda (1970).

No aspecto de média estrutura, referindo-se a poros capilares e fissuras, a pasta de cimento endurecida pode ser considerada um material poroso. A hidratação da pasta de cimento prossegue ao longo do tempo, resultando em alguns poros vazios e umidade relativa reduzida, a qual provoca pressão no poro vazio e retração na pasta (BREUGEL, 1997). A água pode se apresentar dentro dos poros de diferentes maneiras: água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada, como pode se observar na Figura 6 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 6: Água entre as folhas de C-S-H



Fonte: Feldman e Sereda, 1970.

Segundo Bastos (2001), a retração pode ser classificada quanto ao seu estado físico em dois tipos:

✓ Retração plástica: ocorre antes da pega do cimento, devido à perda de água da argamassa, o que resulta na diminuição de volume do sistema.

✓ Retração no estado endurecido: é conhecida por retração por secagem, quando ocorre perda de água no sistema. Ocorre após a pega do cimento, em decorrência da perda de umidade para o meio.

Além disso, a retração pode ser classificada em 5 tipos diferentes: retração plástica, retração autógena, retração por secagem, retração térmica e retração por carbonatação. Destas, apenas a retração plástica ocorre no estado fresco, as demais ocorrem no estado endurecido.

A retração por carbonatação ocorre após a hidratação do cimento, quando é possível a ocorrência de reação química das partículas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com o gás carbônico presente no ar. Essa reação resulta na geração de carbonato de cálcio e a água. Como a água evapora e o carbonato de cálcio apresenta volume menor que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ocorre uma redução no volume total da peça. Em ambientes em que a umidade do ar está em torno de 50%, há uma maior chance de ocorrer retração por carbonatação, pois quando a umidade está próxima de 100% os poros estão preenchidos de água e a difusão do CO_2 se torna lenta demais (NUNES E FIGUEIREDO, 2007).

Já a retração térmica está associada às variações dimensionais que os materiais cimentícios sofrem durante ciclos de aquecimento e resfriamento, e está diretamente associada a características específicas de cada material constituinte, devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica de cada um. As tensões geradas devido à retração e à expansão apresentam componentes de compressão e tração, que podem levar à fissuração do material. Isso ocorre principalmente em ambientes onde há grandes variações de temperatura em curtos espaços de tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

As retrações por secagem e autógena, são de grande relevância para este trabalho e serão abordadas individualmente nos itens 2.6.2.1 e 2.6.2.2 a seguir.

Além dos fenômenos de retração os materiais cimentícios podem apresentar expansão. Este fenômeno ocorre principalmente em situações onde são curados continuamente na água. Isto acontece devido as moléculas de água serem absorvidas pelos materiais constituintes do concreto, como cimento, areias e britas, resultando em uma pressão e pequena expansão entre os poros existentes, o que leva a um aumento do volume total da peça e também da massa (NEVILLE, 1997).

2.6.2.1 Retração autógena

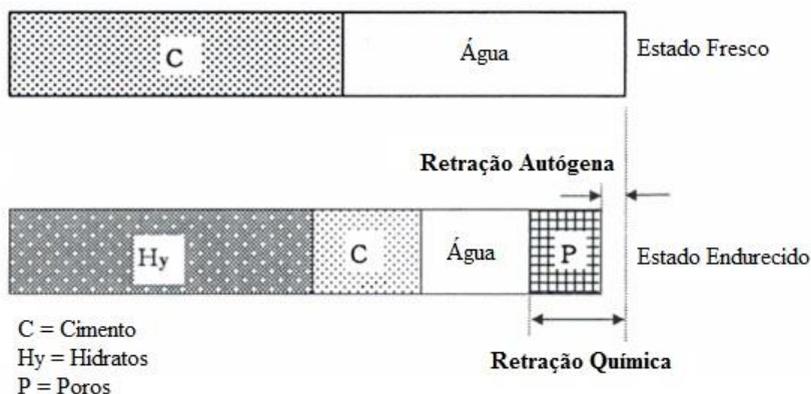
A retração autógena pode ser resumidamente definida como a variação de volume que ocorre na ausência de trocas de calor e umidade com o meio externo, ou seja, o material cimentício pode expandir ou retrair somente com a água livre que contém em seus poros, através da migração da mesma pela rede capilar (NEVILLE, 1997, TAZAWA et al, 2000).

A retração autógena ocorre devido a redução do volume total do material cimentício devido à combinação e adsorção das moléculas de água durante a cinética de hidratação. A água, que antes estava livre nos

poros capilares, migra para a superfície dos cristais de C-S-H recém-formados (BALTHAR, 2004).

Neste sentido, TAZAWA et al, (2000) diferenciam a retração autógena da retração química. Os autores explicam que a retração química é baseada em um princípio bastante simplificado de que o volume total dos materiais anidros mais a água é maior que o volume destes mesmos materiais hidratados. No entanto, esta retração química gera espaços vazios no sólido, micro e mesoporos, e por isso podem não apresentar variação no volume total do material cimentício. Por outro lado, a retração autógena é considerada a variação do volume total do material cimentício considerando o consumo da água livre presente nos poros pela hidratação do cimento (Figura 7).

Figura 7: Representação esquemática da retração química e retração autógena.



Fonte: Adaptado de TAZAWA et al (2000).

Golias, Castro e Weiss (2012) estudaram a pré-molhagem de agregados leves (xisto expandido) com diferentes proporções em argamassas e uma relação a/c de 0,30. Com esta pré-molhagem foi possível obter uma cura interna melhorada, resultando em um aumento no grau de hidratação e diminuição na retração autógena. Já para Jiménez et al. (2013) a retração autógena de argamassas com 5%, 10%, 20% e 40% de substituição de areia natural por agregado reciclado de cerâmica, sem a pré-molhagem dos mesmos, mostrou uma tendência semelhante com a argamassa com 100% de agregado natural.

2.6.2.2 *Retração por secagem*

Segundo Neville (1997) a retração por secagem ocorre através da perda de água adsorvida do material cimentício para o meio, o que a torna uma das principais causas de fissura em concretos e argamassas.

Esta perda de água depende principalmente da situação em que a água se encontra na microestrutura do material cimentício e também da estrutura de poros do material, que vai conduzir a água para o exterior. Já em relação à situação da água no interior do material, pode estar: quimicamente ligada com os compostos hidratados; pode estar presente entre as lamelas de C-S-H nos microporos; pode estar adsorvida nos mesoporos e macroporos; pode estar livre nos macroporos capilares (TAYLOR, 1997).

Em ambientes com umidade relativa menor que 100% ocorre a migração da água do interior do material cimentício para o ambiente externo. A intensidade dessa migração é dependente da umidade relativa e também da estrutura de poros, quanto maiores e mais interconectados, mais facilmente a água sairá do interior do material cimentício. Os mecanismos envolvidos na retração por secagem estão ligados a forças geradas no interior dos poros devido à movimentação da fase líquida. A pressão capilar é uma força de atração existente entre duas paredes de poro preenchido por líquido. Quando a umidade relativa é menor que 100%, o líquido existente no poro sofre evaporação gradativa, o que também aumenta a força de atração entre as paredes do poro, resultando na retração do material. Esta pressão capilar pode ser considerada máxima em poros de 2,5nm em condições de umidade relativa de 40 a 50%, podendo ser desprezíveis em poros maiores que 35nm (YOUNG, 1988).

Também, nos microporos, a gradativa evaporação da água leva à evaporação da água adsorvida na superfície do sólido, reduzindo a espessura da camada de água adsorvida. Isso leva também a redução da força de separação que existe entre as camadas, fazendo com que estas se aproximem para buscar o equilíbrio, resultando em retração (TAYLOR, 1997).

Além disso, TAZAWA et al (2000) explicam que a retração por secagem pode ocorrer simultaneamente com a retração autógena, no entanto, quanto menor for a relação a/c do material cimentício, maior será a fração de água consumida para a hidratação do cimento, e menor será a quantidade de água disponível para evaporação, podendo a retração autógena ser maior que a retração por secagem.

Em relação às normas que preveem a determinação dos valores da retração, a UNE 83831:2010 consiste em determinar a variação do

comprimento de amostras com dimensões de 40mm x 40mm x 160mm, utilizando pelo menos seis amostras da mesma mistura para obter a média final. A EN 1015:13 também calcula a estabilidade dimensional nas argamassas e assemelha-se com a norma citada anteriormente. Nesta norma moldam-se três amostras prismáticas (40mm x 40mm x 160mm) em vez de seis para obter-se o resultado final através da média das deformações obtidas ao longo do tempo em cada prisma. Já na NBR 15261 (2005) para avaliação da variação dimensional das argamassas, foram avaliadas amostras prismáticas com dimensão de 25mm x 25mm x 285mm. Porém, como na norma EN 1015:13 realizam-se quatro leituras, uma para cada lado do corpo-de-prova, sendo utilizada a média de três amostras por mistura.

A Tabela 3 apresenta um quadro-resumo com os resultados obtidos em três artigos em relação à retração de argamassas confeccionadas com diferentes agregados reciclados secos. Estes artigos, estão comentados a seguir.

No estudo realizado por Braga, Brito e Veiga (2012) as argamassas foram moldadas com agregados reciclados finos de concreto (tamanho do grão $<0,150\text{mm}$) e resultaram em um aumento significativo na retração, cerca de 44% maior em relação à argamassa de referência onde foi utilizado agregado natural. Já para Ledesma et al. (2014) onde também foram produzidas argamassas com agregado reciclado de concreto, porém com diâmetro do grão de até 4,8mm, foram obtidos resultados com valores médios de retração muito próximos da argamassa referência com agregado natural, independente do nível de substituição, sendo que apenas 0,04 mm/m de diferença houve entre os teores de substituição de 10 e 40% de agregado reciclado de concreto. O tipo de cimento CEM-IV com alto teor de cinza volante utilizado neste estudo pode ser uma das razões por ter estabilizado esta deformação ao longo do tempo entre os dois tipos de argamassa.

Tabela 3: Quadro-resumo dos resultados da retração

Publicação	Misturas	Dias	Retração	Unidade	Norma Empregada
Ledesma et al., 2014	NA	28	-0,68	mm/m	UNE 83831:2010
		365	-2,68		
	RCA 5%	28	-0,7		
		365	-2,71		
	RCA 10%	28	-0,73		
		365	-2,65		
	RCA 20%	28	-0,74		
		365	-2,7		
	RCA 40%	28	-0,74		
		365	-2,69		
Jiménez et al., 2013	NA	28	-0,65	mm/m	UNE 83831:2010
		365	-2,7		
	DMA 5%	28	-0,62		
		365	-2,6		
	DMA 10%	28	-0,75		
		365	-2,75		
	DMA 20%	28	-0,85		
		365	-2,8		
	DMA 40%	28	-0,75		
		365	-2,7		
Braga, Brito e Veiga, 2012	NA	28	-0,04	%	EN 1015:13
		90	-0,049		
	RFCA 15%	28	-0,055		
		90	-0,071		

* NA - Agregado Natural

* DMA - Agregado reciclado de entulho de paredes (tijoloscerâmicos e argamassa de alvenaria)

* RFCA - Agregado reciclado fino de concreto

* RCA - Agregado reciclado de concreto

No entanto, Jiménez et al. (2013), utilizaram agregado reciclado de entulho de paredes (tijolo de cerâmica vermelha e argamassa de alvenaria), chamado de DMA, em substituição à areia natural de 5%, 10%, 20% e 40%, os quais apresentaram uma tendência similar em comparação à argamassa referência com 100% de agregado natural. A argamassa com 5% de substituição de agregado natural por DMA apresentou menor retração em relação à argamassa referência, porém todas as substituições acima de 10% aumentaram a retração, mas não significativamente.

2.7 AVALIAÇÃO DO EFEITO DOS AGREGADOS POROSOS NA MICROESTRUTURA

2.7.1 Adsorção e dessorção dos agregados

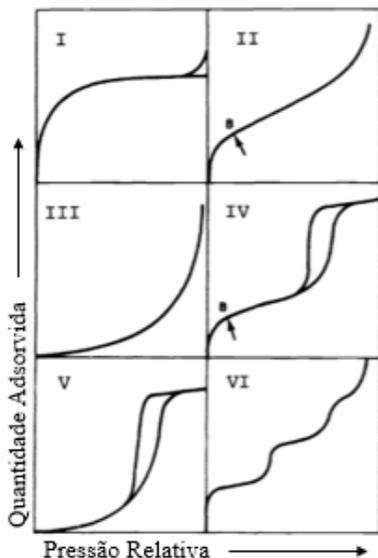
A adsorção pode ser definida como a fixação de partículas de água nos poros de certo material, em conjunto à ação das forças intermoleculares. O fenômeno de adsorção ocorre mais comumente quando há materiais com poros de dimensões menores e em locais com umidades mais elevadas aumentando a espessura da camada de água adsorvida por esses poros (BERTOLINI, 2010).

A dessorção se refere à quantidade de água que um material libera quando está exposto a um ambiente com níveis variados de umidade relativa e a adsorção é a inversão disso, ou seja, é quanto um material adsorve de água no seu interior estando em ambientes de diferentes umidades relativas. Por meio destas características é possível saber se o material será viável para utilização na cura interna da hidratação da argamassa.

A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry) (1997) define seis diferentes tipos de curvas de adsorção e dessorção (Figura 8) para caracterização dos materiais, principalmente em relação à quantidade de poros presente em sua estrutura, que podem ser classificados, conforme já citado anteriormente, em: microporos, que têm diâmetro < 2 nm; os mesoporos com diâmetro entre $2 < \text{Ø} < 50$ nm e; os macroporos com diâmetro > 50 nm.

A partir das isotermas de adsorção e dessorção determina-se quanto um material poroso contém de teor de água em seu interior em função da umidade relativa do ar. Além de ser possível medir a distribuição do volume de poros pela massa de água adsorvida (SATO, 1998; PAES, 2004 *apud* SALOMÃO, 2016).

Figura 8: Diferentes tipos de curvas de adsorção e dessorção de um material



Fonte: Adaptado de IUPAC (1982).

As curvas são classificadas como (IUPAC, 1982):

Tipo I: São reversíveis (a adsorção e a dessorção percorrem os mesmos caminhos) e são características de materiais microporosos, como zeólitos e carvão ativado.

Tipo II: São reversíveis, mas ao contrário do Tipo I, são características de materiais não porosos ou macroporosos (não há barreiras físicas à adsorção), com grande interação entre gás e sólido.

Tipo III: Assim como as de tipo II, são características de materiais pouco porosos, mas nesse caso, a interação entre gás e sólido é baixa.

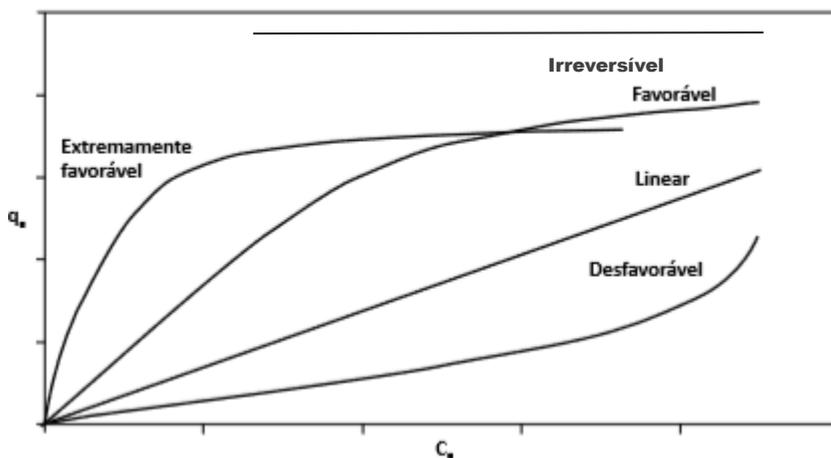
Tipo IV: São irreversíveis, e características de materiais mesoporosos. Nesse caso, ainda há condensação capilar do gás adsorvido, o que mostra o início da curva.

Tipo V: São irreversíveis, mas diferentemente do tipo IV, a interação entre sólido e gás é baixa e não há condensação.

Tipo VI: Múltiplas camadas de gás são adsorvidas em torno da superfície do sólido não poroso e uniforme.

Através destas definições é possível determinar qual o tipo de isothermas de adsorção e dessorção resulta cada material estudado. Além disso, os gráficos obtidos através do ensaio de isothermas de adsorção podem resultar em comportamentos distintos e apresentar informações importantes a respeito do mecanismo da adsorção, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9: Comportamento das curvas de adsorção



Fonte: Adaptado de McCABE et al. (1993).

Estes comportamentos podem ser definidos como (McCABE et al., 1993):

– Favorável: a massa do adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente é alta, em um ambiente com baixa concentração de umidade do adsorvato na fase fluída;

– Linear: a massa do adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente é proporcional à concentração de umidade do adsorvato na fase fluída;

– Irreversível: a massa do adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente independe da concentração de umidade do adsorvato na fase fluída;

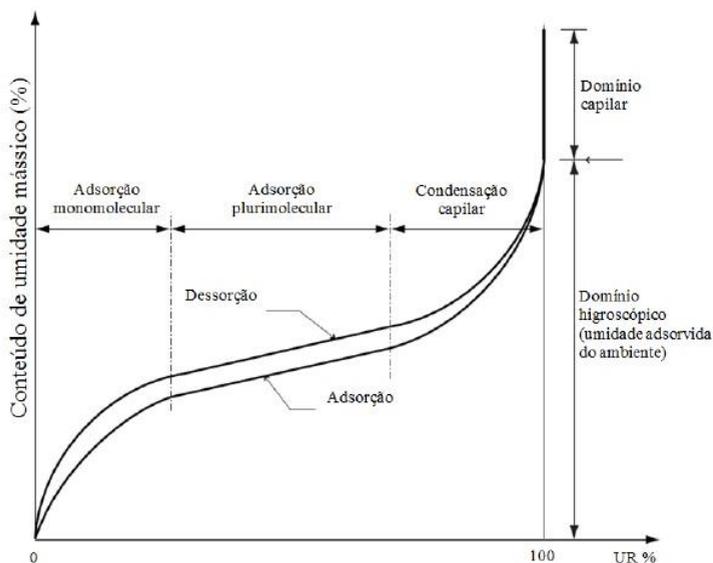
– Desfavorável: a massa do adsorvato retida por unidade de massa do adsorvente é baixa mesmo em um ambiente com alta concentração de umidade do adsorvato na fase fluída.

Para materiais comumente utilizados na construção civil, como concretos e argamassas, a curva dita como “desfavorável” seria a mais desejada, pois de todas elas, é a que resulta em uma menor quantidade de líquido adsorvido, mesmo estando em um ambiente de alta umidade relativa.

Além disso, Freitas, Torres e Guimarães (2008) apresentam graficamente o comportamento genérico das curvas de adsorção e dessorção de materiais da construção civil. Estes materiais, quando inseridos em locais com umidade relativa variável, alteram seu teor de umidade também. O fenômeno descrito e que está apresentado no gráfico da Figura 10, é atribuído às forças intermoleculares ou de Van der Waals que atuam na interface sólido-fluído, no interior dos poros.

Ainda, os autores descrevem que primeiramente acontece a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interna dos poros, nomeada de adsorção monomolecular, em seguida, são preenchidas por várias destas camadas, a qual é chamada de adsorção plurimolecular. Também pode ocorrer a chamada condensação capilar, que acontece quando o diâmetro dos poros é pequeno e há a junção das camadas plurimoleculares. Estes fenômenos ocorrem quando há o aumento da umidade relativa.

Figura 10: Curvas genéricas de Adsorção e dessorção de materiais de construção civil



Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (2008).

As isotermas de adsorção foram primeiramente estudadas por Langmuir e nomeadas de teoria monomolecular. Esta, defendia que em situações de equilíbrio, existiam taxas iguais de condensação e evaporação sobre a superfície sólida, que formavam uma camada de moléculas líquidas na estrutura porosa (ATKINS, 1999a *apud* SALOMÃO, 2016). Logo em seguida, esta teoria foi aprimorada por BRUNAUER, EMMET e TELLER (BET), onde os mesmos constataram que esta superfície que antes formava uma única camada, era recoberta por várias camadas sobrepostas umas às outras, sendo assim chamadas de teoria multimolecular ou BET. Enfim, definiu-se que o estado de equilíbrio há evaporação em uma das camadas de moléculas da superfície sólida e condensação em uma camada imediatamente inferior, desta maneira, foi aprimorada a teoria de BET e desenvolvido o modelo de GAB, que é o mais utilizado atualmente.

Os autores Pickel, Tighe e West (2017) através da ASTM C1498, utilizaram soluções de sal saturado e criaram cinco níveis de umidades relativas, colocando as amostras confeccionadas para o estudo em cada

um destes ambientes e registrando a perda de massa, causada pela perda de água das amostras. Os resultados obtidos para os agregados reciclados estudados, ou seja, RCA1 (agregado reciclado de concreto não estrutural) e RCA2 (agregado reciclado de concreto confeccionado em usina), são que os mesmos retêm cerca de 95% da água percolada total em um ambiente de umidade relativa de 93%, sendo assim, a dessorção desses materiais não ajuda na cura interna.

Outro estudo analisou o comportamento de 16 tipos de agregados leves (LWA) na perda de água, devido à grande quantidade de poros presente nesse material, através de uma isoterma de dessorção (perda de massa em função da umidade relativa), com um analisador de sorção de vapor em condições de temperatura e umidades controladas. Primeiramente, o agregado foi seco ao forno, em uma temperatura de 105 °C por um período de 24 horas, após arrefecido e depositado em água. Foram separadas amostras dos agregados leves passantes na peneira #16 e retidas na peneira #30, com pesagem entre 40-50mg, logo em seguida depositadas na câmara úmida a 23°C e 98% de umidade relativa, até obter uma massa estável. Quando a amostra já estava estabilizada, alterou-se a umidade relativa da câmara até que atingisse 0% de umidade relativa.

Para obter uma cura interna com maior efetividade os agregados que resultam em melhores curvas de adsorção e dessorção são os agregados porosos, pois os mesmos mantêm a água em seus poros e liberaram-na no período de hidratação do material cimentício. Esta capacidade de manter e depois liberar a água mesmo em ambientes com umidade relativa elevada é chamada de isotermas de adsorção e dessorção (CASTRO et al., 2011).

A ASTM C1498 especifica que embora a dessorção seja o inverso da adsorção, a maioria dos materiais porosos alcança diferentes níveis de equilíbrio durante estes dois processos. Sendo assim, normalmente o teor de umidade de equilíbrio na isoterma de dessorção é maior que o da isoterma de adsorção para o mesmo nível de HR.

2.7.2 Absorção por capilaridade

A capilaridade, ou absorção capilar, é o processo resultante do contato entre um material poroso e um líquido, e é governado pela energia de molhamento, que modifica o equilíbrio da interface sólido/líquido e permite o movimento ascensional do líquido através dos poros do sólido. Este processo é inversamente proporcional ao diâmetro dos poros, de maneira que quanto maior for o poro, menor a energia de molhamento e menor a capilaridade (CALLISTER, 2012).

O transporte da água pela capilaridade é um fenômeno originado principalmente pela ascensão capilar. A ascensão capilar é a atração das moléculas do líquido pelas moléculas do sólido, ou então, provocada pelo molhamento da superfície do sólido que reduz a energia livre superficial, fazendo a água subir (BERTOLINI, 2010).

A capacidade de um material em absorver e drenar a água por meio da capilaridade, ou seja, através dos poros capilares, é a propriedade pela qual, indiretamente, pode-se avaliar a durabilidade dos materiais cimentícios. Isto porque, quando um material apresenta uma maior absorção de água pelos poros capilares, o mesmo se torna mais suscetível a efeitos externos, como por exemplo, em caso de revestimentos, as ações do clima ou a agentes agressivos que prejudicam a argamassa (SILVA, BRITO, DHIR, 2016).

A absorção de água por capilaridade em alguns estudos foi realizada de acordo com a UNE – EN 1015-18 em amostras com variação de massa constante após 24 horas na estufa a 60 °C, tendo uma de suas faces laterais impermeabilizadas e protegidas com uma gaze. Foram utilizadas amostras de 40mm x 40mm x 80mm onde uma de suas faces eram parcialmente imersas em água (impermeabilizando-as), nos primeiros minutos de imersão eram anotadas as pesagens das amostras e depois a cada 24 horas até estabilizar sua massa, ou seja, atingir a saturação completa das amostras. Artigos que utilizaram este ensaio: MARTÍNEZ et al., 2016; JIMÉNEZ et al., 2013; LEDESMA et al., 2014; SILVA, BRITO, DHIR, 2016.

Através desse ensaio Martínez et al. (2016) ao estudar argamassas com substituição de 100% do agregado natural por três tipos de agregados reciclados (RA1 – agregado reciclado de cerâmica; RA2 – agregado reciclado misto; RA3 – agregado reciclado de concreto), concluiu que os três tipos de agregados reciclados apresentaram uma maior absorção capilar, isto, devido a maior absorção do agregado. Jiménez et al. (2013), encontraram valores similares, mas com substituições de agregado reciclado de escombros de paredes (tijolo cerâmico vermelho e argamassa de alvenaria) em menor proporção. Com substituições de até 20% aumentou a absorção capilar da argamassa, porém, com substituições de 5% e 10% os valores foram menores, devido a sua capacidade de preencher os vazios das partículas menores.

Braga, Brito e Veiga (2012) também estudaram a influência da incorporação de agregados reciclados em argamassa e analisaram o seu comportamento na absorção por capilaridade, porém, diferentemente dos estudos citados anteriormente, utilizaram agregados reciclados finos de concreto (<0,150mm de dimensão) em substituições de 5%, 10% e 15%

do agregado natural. Os valores obtidos através do ensaio foram de $1,25 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ para argamassa referência e $0,9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$, $0,79 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e $0,71 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$, para 5%, 10% e 15% de substituição, respectivamente. Como pode-se perceber o maior valor de absorção por capilaridade foi da argamassa referência, podendo concluir assim, que a incorporação de finos de agregado reciclado de concreto melhora esta propriedade da argamassa.

Silva, Brito e Dhir (2016) através da análise de vários artigos, avaliaram que a absorção por capilaridade, quando utilizados agregados naturais, aumentavam o seu valor, comparadas a argamassas com agregados reciclados. Isso, apesar de ser contraditório, considerando que os agregados reciclados têm uma absorção de água maior em relação aos agregados naturais, pode ser explicado pelas argamassas com agregados reciclados resultarem em tamanhos de poros mais distribuídos pela rede capilar.

2.8 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De maneira em geral argamassas e concretos que tenham agregados reciclados em sua composição, resultam em desempenho mecânico inferior, em relação à argamassa de referência com agregados naturais. Com base nos dados coletados na revisão bibliográfica, onde foram relatados estudos com argamassas e concretos com substituição de agregados naturais por agregados reciclados (concreto, cerâmica, entre outros), pôde-se elaborar um método experimental para obter uma melhor compreensão do comportamento destes agregados em diferentes situações, avaliando o desempenho mecânico e a cura interna das argamassas.

Alguns autores, na tentativa de melhorar as propriedades das argamassas, utilizaram diferentes porcentagens de substituição de RCD, diferentes dimensões das partículas, relações a/c mais baixas, tipos diferentes de cura e pré-molhagem dos agregados. Como por exemplo, Pickel, Tighe e West (2017), que avaliaram dois tipos de agregados reciclados de concreto, com agregados pré-molhados e argamassas mantidas em cura a 100% de HR, concluindo através do ensaio de isotermas de dessecção, que os reservatórios de água no interior da mistura não ajudam na cura interna (CI) dos concretos. Ainda, outros autores, afirmam que a melhoria na cura interna pela liberação de água prolongada que os agregados porosos resultam, podem causar reduções na retração autógena (BENTZ, 2009; BENTZ et al., 2009; VARGAS; RESTREPO-BAENA; TOBÓN, 2017). Zhao et al. (2015) estudaram

vários fatores que interferem nas propriedades das argamassas, como, relação a/c, diferentes porcentagens de substituições do agregado fino reciclado de concreto, grau de pré-molhagem e dimensão dos agregados empregados na mistura, encontrando menores desempenhos mecânicos comparadas à argamassa de referência através do ensaio de resistência à compressão. Além disso, Castro et al. (2011) e Pickel, Tighe e West (2017), avaliaram a capacidade dos agregados porosos em manter e posteriormente liberar a água mesmo em ambientes com umidade relativa elevada, através de ensaio de adsorção e dessorção determinando características da rede porosa dos materiais.

Em vista disso, o presente estudo objetiva analisar o comportamento de três agregados porosos: agregado reciclado de concreto, agregado reciclado de cerâmica e agregado leve de argila expandida. Os agregados reciclados foram estudados para que possam ser reutilizados em argamassas e concretos, gerando uma menor quantidade de resíduos e preservação dos recursos naturais. Já para os agregados leves foi escolhida a argila expandida, por ser um agregado comumente utilizado em estudos comparativos com agregados porosos.

Estes agregados serão avaliados na argamassa em diferentes parâmetros: tipos diferentes de curas, pré-molhagem e secagem dos agregados, porcentagem de substituição de 20% e diferentes dimensões das partículas. Para os tipos de cura, foi utilizada a cura autógena e cura à 47% HR, para que fosse possível avaliar o comportamento das argamassas em ambientes com umidade relativa alta e baixa. As diferentes dimensões serão estudadas para verificar qual dimensão do agregado reciclado resultaria em um melhor desempenho mecânico e em uma liberação de água durante o período de hidratação maior, o mesmo, foi analisado em questão da saturação dessas partículas, avaliando se a pré-molhagem ou secagem contribuiria para uma melhoria na hidratação da pasta, conforme realizado no estudo de Poon et al. (2004), Bentz (2009) e Shen et al. (2017).

Para que fosse possível realizar as análises propostas, serão realizados os ensaios de resistência mecânica, retração, isotermas de adsorção, absorção por capilaridade e porosidade aberta. Com o ensaio de resistência à compressão, pôde-se analisar qual das diferentes variáveis resultavam em diferenças significativas no desempenho mecânico e se melhoravam a hidratação da pasta. Para o ensaio de retração, foi avaliado, principalmente, o comportamento destas argamassas em diferentes tipos de cura, verificando em qual ambiente a retração ocorreu com menor intensidade e o efeito da pré-molhagem dos agregados. Em relação ao ensaio de isotermas de adsorção, absorção por capilaridade e porosidade

aberta, serão realizados para avaliar as características dos poros destas argamassas, referindo-se à conectividade entre eles e ao refinamento, conseguindo identificar através disso, se houve uma melhor hidratação na pasta de cimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados foram: agregado reciclado de concreto, agregado reciclado de cerâmica e agregado leve (argila expandida).

3.1.1 Água

Empregou-se água destilada/deionizada, visando evitar a presença de minerais.

3.1.2 Cimento

O tipo de cimento selecionado para o estudo foi o CP II-F classe 32 sem adição de materiais como pozolanas e escórias.

3.1.3 Agregados

Para este estudo foram utilizados quatro tipos de agregados miúdos: areia padrão (IPT), agregado reciclado de concreto, agregado reciclado de cerâmica e agregado leve (argila expandida). Os mesmos foram utilizados em cinco dimensões diferentes de 0,15mm, 0,3mm, 0,6mm, 1,2mm e 2,4mm, para analisar a influência destas faixas granulométricas no processo de pré-molhagem e secagem destes materiais na argamassa. A porção granulométrica final foi formada por 20% em massa de cada fração.

O agregado reciclado foi doado pela usina SC Recibras, que está localizada na cidade de Camboriú/SC. O agregado de concreto foi composto por resíduos de concreto de caminhão betoneira, coletado conforme a norma NBR 10007. Para o agregado leve, foi recebido através de doação da empresa Cinexpan Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda, a qual está localizada no estado de São Paulo, no município de Várzea Paulista.

3.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

O presente estudo foi dividido em 5 etapas. Etapa 1: caracterização do material, que foi primordial para o cálculo da dosagem e para a quantidade de água necessária a ser utilizada na pré-molhagem. Na etapa 2: preparação das condições de umidades dos agregados, preparo das argamassas e tipo de cura utilizado. Na etapa 3, apresenta-se o

comportamento das argamassas no estado fresco e na etapa 4 o comportamento mecânico no estado endurecido. Por fim, é avaliada a microestrutura da argamassa, devido à estrutura porosa dos agregados reciclados e agregado leve utilizados.

A Tabela 4 mostra os ensaios, métodos, quantidade de amostras e normas utilizadas nas etapas 3, 4 e 5, para determinar as propriedades das argamassas.

Tabela 4: Ensaios, métodos, quantidade de amostras e normas para argamassas estudadas

Propriedades	Ensaio	Dimensão dos Corpos-de-prova	Dias de ensaio (dias)	Quantidade de amostras	Métodos
Propriedades das Argamassas no Estado Fresco	Trabalhabilidade	-	-	-	NBR 13276:2016
	Massa Específica Aparente e Teor de ar Incorporado	-	-	2	NBR 13278:2005
Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido	Resistência à Compressão	4 x 4 x 16 cm	28	6	NBR 13279:2005
	Resistência à Flexão	4 x 4 x 16 cm	28	3	NBR 13279:2005
	Retração	2,5 x 2,5 x 28,5 cm	1, 3, 28 e 63	3	NBR 15261:2005
Propriedades Higrotérmicas no Estado Endurecido	Isoterma de Adsorção	Ø5 x 1 cm	-	2	ASTM C1498
	Absorção por Capilaridade	Ø5 x 10 cm	28	3	NBR 9779:1995
	Porosidade aberta	Ø5 x 1 cm	-	3	NBR 9778:2009

3.2.1 Etapa 1 – Caracterização dos materiais

3.2.1.1 Composição Granulométrica

Para obtenção do agregado total, foram compostas cinco dimensões granulométricas: 0,15mm, 0,30mm, 0,60mm, 1,2mm e 2,4mm; e quatro tipos de agregados, o primeiro como referência e os outros de natureza porosa: areia padrão (IPT), agregado reciclado de

concreto (ARCN), agregado reciclado de cerâmica (ARCE) e agregado leve de argila expandida (AL). O AL foi utilizado como referência porosa.

A nomenclatura utilizada para demarcação dos corpos-de-prova e a porcentagem para composição do traço foi realizada conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Nomenclatura das argamassas

Agregados		Dimensão da Partícula (mm)					Porcentagens		Condição de Saturação	
Tipo	Dimensão	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	NA	Agregados Porosos	Seco	Pré-Molhado (SSS)
Areia Natural							100%	0%	S	M
ARCN	2,4	2,4					80%	20%	S	M
ARCE	2,4	2,4					80%	20%	S	M
AL	2,4	2,4					80%	20%	S	M
ARCN	1,2		1,2				80%	20%	S	M
ARCE	1,2		1,2				80%	20%	S	M
AL	1,2		1,2				80%	20%	S	M
ARCN	0,6			0,6			80%	20%	S	M
ARCE	0,6			0,6			80%	20%	S	M
AL	0,6			0,6			80%	20%	S	M
ARCN	0,3				0,3		80%	20%	S	M
ARCE	0,3				0,3		80%	20%	S	M
AL	0,3				0,3		80%	20%	S	M
ARCN	0,15					0,15	80%	20%	S	M
ARCE	0,15					0,15	80%	20%	S	M
AL	0,15					0,15	80%	20%	S	M

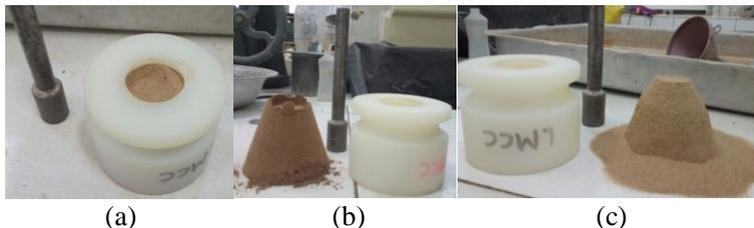
3.2.1.2 *Massa específica e Massa específica do agregado na SSS*

A massa específica do agregado seco e em superfície saturada seca foi determinada de acordo com o procedimento da NBR NM 52 (2009). Ensaio executado com duas amostras para obtenção da média dos resultados obtidos.

Foram separadas amostras de 1kg de agregado miúdo através do quartejamento do material e colocadas em um recipiente com água por 24 horas. Passado esse período, retirou-se a amostra e foi estendida sobre uma superfície plana, para obter-se uma secagem uniforme do material. Quando alcançada esta secagem colocou-se o material em um molde, compactou-se sua superfície suavemente com 25 golpes da haste de compactação, e então, levantou-se o molde. Se tivesse umidade superficial, o agregado conservava o formato do molde, mas se o

agregado miúdo desmoronasse parte dele com a retirada do molde, o agregado teria alcançado a condição de superfície saturada seca. As fotos da Figura 11 apresentam o processo para encontrar a superfície saturada seca dos agregados, como descrito anteriormente.

Figura 11: Processo para encontrar a superfície saturada seca dos agregados. (a) Amostra compactada no molde; (b) Amostra com umidade superficial; (c) Amostra na SSS.



Depois de preparar o agregado miúdo para o ensaio, executou-se o método do picnômetro, onde pesou-se 500g da amostra, foi inserida no frasco e registrou-se a massa do conjunto, anotando também, a massa do frasco completo com água e a massa do frasco com material e água sem que contenha bolhas de ar.

A massa específica do agregado seco foi calculada através da Equação 2:

$$\rho_s = \frac{m}{V - V_a} \quad (2)$$

Onde:

ρ_s = é a massa específica aparente do material seco, em g/cm³;

m = é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V = é o volume do frasco, em cm³;

V_a = é o volume de água adicionada ao frasco, em cm³ conforme a

Equação 3:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (3)$$

Onde:

m₁ = é a massa do frasco com o agregado, em gramas;

m₂ = é a massa do frasco, com agregado e água, em gramas;

ρ_a = é a massa específica da água, gramas.

E a massa específica do agregado saturado superfície seca foi obtida através da Equação 4:

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (4)$$

Onde:

d_2 = é a massa específica do agregado saturado com superfície seca, em g/cm³;

m_s = é a massa da amostra na condição de superfície saturada seca, em gramas;

V = volume do frasco, em cm³;

V_a = é o volume de água adicionada ao frasco, em cm³.

Determinar o valor da massa específica dos materiais foi importante para calcular os traços das argamassas em estudo. Este valor serve também para classificar o material em leve, normal e pesado.

3.2.1.3 Absorção de água

A absorção de água foi determinada conforme preconiza a norma NBR NM 30 (2001). O primeiro passo constituiu em secar os agregados em estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas ou até encontrar a constância da massa seca. Logo depois de encontrar a massa seca, colocou-se a amostra imersa em água por 24 horas. Passado esse período, o agregado foi depositado sobre uma superfície plana até se encontrar na condição de superfície saturada seca.

A Equação 5 foi utilizada para determinar a absorção de água dos agregados:

$$A_{\%} = \frac{m_s - m}{m} \times 10 \quad (5)$$

Onde:

$A_{\%}$ = é a absorção de água, em %;

m_s = é a massa na condição de superfície saturada seca; em gramas;

m = é a massa da amostra seca em estufa, em gramas.

3.2.2 Etapa 2 – Caracterização das misturas

3.2.2.1 Preparo das argamassas

Para o preparo das argamassas foi fixada uma relação a/c de 0,5 mantendo um mesmo volume de pasta e utilizando traço unitário de 1:3

(cimento:agregado) em volume. Este valor de 0,5 foi escolhido após testes realizados, utilizando uma relação a/c baixa que permitisse a moldagem das argamassas com agregados pré-molhados. Pode-se visualizar nas Tabela 6 e Tabela 7 o consumo da argamassa unitário realizado para cada mistura e em diferentes condições de saturação.

Tabela 6: Traço unitário para argamassas com agregados secos

Misturas	Cimento Total	Agregado - Dimensão (mm)					Agregado Total	Água Total
		2,40	1,20	0,60	0,30	0,15		
		Referência	1	0,60	0,60	0,60		
ARCN 2,4	1	0,56	0,61	0,61	0,61	0,61	3	0,5
ARCN 1,2	1	0,61	0,57	0,61	0,61	0,61	3	0,5
ARCN 0,6	1	0,61	0,61	0,56	0,61	0,61	3	0,5
ARCN 0,3	1	0,61	0,61	0,61	0,55	0,61	3	0,5
ARCN 0,15	1	0,61	0,61	0,61	0,61	0,56	3	0,5
ARCE 2,4	1	0,57	0,61	0,61	0,61	0,61	3	0,5
ARCE 1,2	1	0,61	0,56	0,61	0,61	0,61	3	0,5
ARCE 0,6	1	0,61	0,61	0,56	0,61	0,61	3	0,5
ARCE 0,3	1	0,61	0,61	0,61	0,55	0,61	3	0,5
ARCE 0,15	1	0,61	0,61	0,61	0,61	0,55	3	0,5
AL 2,4	1	0,29	0,68	0,68	0,68	0,68	3	0,5
AL 1,2	1	0,67	0,33	0,67	0,67	0,67	3	0,5
AL 0,6	1	0,66	0,66	0,37	0,66	0,66	3	0,5
AL 0,3	1	0,64	0,64	0,64	0,45	0,64	3	0,5
AL 0,15	1	0,63	0,63	0,63	0,63	0,50	3	0,5

Tabela 7: Traço unitário para argamassas com agregados pré-molhados

Traços - Agregados Pré-molhados										
Misturas	Cimento Total	Agregado - Dimensão (mm)					Agregado Total	Água Pré-molhagem	Água Mistura	Água Total
		2,40	1,20	0,60	0,30	0,15				
Referência	1	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	3	0,00	0,50	0,50
ARCN 2,4	1	0,54	0,61	0,61	0,61	0,61	3	0,04	0,46	0,50
ARCN 1,2	1	0,62	0,53	0,62	0,62	0,62	3	0,05	0,45	0,50
ARCN 0,6	1	0,62	0,62	0,52	0,62	0,62	3	0,06	0,44	0,50
ARCN 0,3	1	0,62	0,62	0,62	0,51	0,62	3	0,06	0,44	0,50
ARCN 0,15	1	0,62	0,62	0,62	0,62	0,50	3	0,06	0,44	0,50
ARCE 2,4	1	0,54	0,61	0,61	0,61	0,61	3	0,05	0,45	0,50
ARCE 1,2	1	0,62	0,54	0,62	0,62	0,62	3	0,05	0,45	0,50
ARCE 0,6	1	0,62	0,62	0,53	0,62	0,62	3	0,05	0,45	0,50
ARCE 0,3	1	0,62	0,62	0,62	0,51	0,62	3	0,05	0,45	0,50
ARCE 0,15	1	0,62	0,62	0,62	0,62	0,50	3	0,05	0,45	0,50
AL 2,4	1	0,34	0,67	0,67	0,67	0,67	3	0,19	0,31	0,50
AL 1,2	1	0,66	0,34	0,66	0,66	0,66	3	0,08	0,42	0,50
AL 0,6	1	0,65	0,65	0,41	0,65	0,65	3	0,11	0,39	0,50
AL 0,3	1	0,62	0,62	0,62	0,51	0,62	3	0,06	0,44	0,50
AL 0,15	1	0,63	0,63	0,63	0,63	0,46	3	0,06	0,44	0,50

Por meio da absorção de água encontrada de cada agregado (reciclado e leve) na superfície saturada seca, foi determinada a quantidade de água necessária para realizar a pré-molhagem. Com isso, introduziu-se a porcentagem de agregado de cada mistura em um saco plástico e a quantidade de água necessária para atingir a condição de SSS, no mesmo tempo utilizado para definir a absorção de água do material (24 horas). A embalagem foi devidamente vedada, para que não houvesse troca de umidade com o ambiente e o agregado pudesse absorver apenas a água adicionada.

Para realização das misturas utilizou-se o procedimento a seguir: adicionou-se a água e o cimento deixando-os em repouso por 30 segundos, passado esse período, misturou-se por 30 segundos na velocidade baixa do misturador padrão de argamassa da NBR 7215 (1997), adicionou-se então, o agregado miúdo e misturou-se por mais 30 segundos, após isso a argamassa ficou em repouso por mais 1 minuto e 30 segundos, finalizando com mais uma mistura, porém com 1 minuto e na velocidade alta do misturador.

Primeiramente, foram moldadas as argamassas com agregados na pré-molhagem, realizando os ensaios no estado fresco e endurecido das argamassas. Em uma segunda etapa, os agregados na condição seca foram estudados, ondem foram selecionadas as dimensões das partículas que

obtiveram melhores resultados com a pré-molhagem, prosseguindo assim, com o estudo nas duas condições: pré-molhagem e secos.

3.2.2.2 *Cura*

Foram realizados dois tipos de cura para cada mistura, a cura autógena e cura com uma umidade relativa de 47% após a desmoldagem das argamassas na idade de 28 dias. A cura autógena consistiu em envolver os corpos de prova em papel insulfilm e de alumínio, para que o mesmo não tenha contato com o meio e realize a sua própria cura. Para a segunda cura que foi utilizada uma umidade relativa de 47%, utilizou-se uma caixa de acrílico onde adicionou-se uma solução saturada salina de bicromato de sódio no fundo, para que a mesma mantivesse a umidade relativa de 47% no seu interior. A temperatura ambiente foi em torno de 23 °C.

3.2.3 **Etapa 3 – Comportamento no estado fresco da argamassa**

3.2.3.1 *Trabalhabilidade*

A trabalhabilidade ou índice de consistência da argamassa foi determinada de acordo com a norma NBR 13276 (2016). O ensaio foi realizado logo após a moldagem da argamassa, utilizando a mesma para encher o molde troncônico. O molde foi depositado no meio da mesa e segurado firmemente para enchê-lo com três camadas de alturas aproximadamente iguais, onde foram aplicados 15, 10 e 5 golpes com um soquete. Para regularizar a camada superior do molde, passou-se uma régua metálica rente a sua borda. Depois, retirou-se o molde e acionou-se a manivela da mesa de modo que suba e caia 30 vezes. Após a última queda da mesa, mediu-se com o paquímetro, em três pontos diferentes, o espalhamento da argamassa. O índice de consistência foi a média das três medições do espalhamento da argamassa.

3.2.3.2 *Massa específica aparente e teor de ar incorporado no estado fresco da argamassa*

De acordo com a NBR 13278 (2005) para encontrar a massa específica da argamassa no estado fresco, foi utilizado um recipiente cilíndrico com volume conhecido. Através de uma balança pesou-se o recipiente vazio com uma placa de vidro e anotou-se sua massa, após encher com água destilada o cilindro foi rasado com a placa de vidro (para

que não tenha bolhas de ar sob a placa) e anotada sua massa. A diferença dessas massas vai resultar no valor do seu volume (V_r).

Imediatamente após o preparo da argamassa, inseriu-se a mesma em um recipiente cilíndrico com três camadas aproximadamente iguais, aplicando vinte golpes em cada uma delas ao longo do perímetro da argamassa. Terminado isso, realizaram-se três quedas do recipiente (altura aproximada de 3 cm), para que não tivesse presença de vazios na argamassa e rasou-se a parte superior do cilindro com a espátula, anotando seu peso. Também, para que não tivesse perda de água da argamassa, vedou-se com fita veda rosca a parte inferior deste cilindro.

A massa específica foi calculada através da Equação 6:

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000 \quad (6)$$

Onde:

d = é a massa específica da argamassa, em kg/m^3 ;

m_c = é a massa do recipiente cilíndrico com a argamassa, em gramas;

m_v = é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;

V_r = é o volume do recipiente cilíndrico, em cm^3 .

O teor de ar incorporado na argamassa foi calculado através da Equação 7:

$$A_i = 100 \times \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (7)$$

Onde:

A_i = é o teor de ar incorporado na argamassa, em %;

d = é a massa específica da argamassa, em g/cm^3 ;

d_t = é a massa específica teórica da argamassa, ou seja, sem vazios, em g/cm^3 .

3.2.4 Etapa 4 - Comportamento no estado endurecido da argamassa

3.2.4.1 Resistência à compressão e resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão foram executados conforme preconiza a norma NBR 13279 (2005) e obteve-se os resultados na idade de 28 dias.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão foram confeccionados três corpos-de-prova para cada mistura com dimensões de 4cm x 4cm x 16cm. Os mesmos foram posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento, onde foi aplicada uma carga de 50 ± 10 N/s até a sua ruptura. A Equação 8 calcula a resistência à tração na flexão:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times L}{40^3} \quad (8)$$

Onde:

R_f = é a resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f = é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

L = é a distância entre os suportes, em mm.

Para resistência à compressão, utilizou-se os corpos-de-prova rompidos da flexão, resultando em 6 amostras, que foram posicionadas no dispositivo de apoio do equipamento e aplicada uma carga de 500 ± 50 N/s até sua ruptura. A resistência à compressão foi calculada pela Equação 9:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (9)$$

Onde:

R_c = é a resistência à compressão, em MPa;

F_c = é a carga máxima aplicada, em N;

A = é a área da seção, em mm².

3.2.4.2 Retração

O ensaio de retração foi realizado conforme preconiza a norma NBR 15261 (2005) para avaliação da variação dimensional das argamassas. Para o processo de moldagem, foram preparados os moldes prismáticos de 25mm x 25mm x 285mm aplicando uma fina camada de óleo mineral e, logo após, anexados os pinos de medida, tendo cuidado para que os mesmos estivessem limpos, visando uma melhor aderência à argamassa. A moldagem foi efetuada em duas camadas de 25 golpes cada, tendo principalmente um cuidado em torno dos pinos, para que os mesmos estejam bem firmes à argamassa após a desmoldagem e também para que se obtenha uma mistura homogênea.

Os corpos-de-prova foram desformados após 48 horas, anotando sua massa inicial através de uma balança e suas leituras iniciais por meio de um relógio comparador como apresenta a Figura 12. Porém, para realizar a leitura dos corpos-de-prova efetuou-se em cada leitura a

calibração do relógio comparador, através de uma barra padrão, onde anotou-se seu comprimento e após isso, o relógio foi zerado, e só então introduzida a barra das amostras para realizar as leituras. Foram obtidas quatro leituras de cada amostra, por meio da rotação do corpo-de-prova, onde o mesmo foi girado sempre na mesma direção e lendo os resultados de L1, L2, L3 e L4, para depois escolher o ponto mais crítico entre eles, ou seja, o que resultou em uma maior retração ou expansão da argamassa. Depois disso, foram armazenados conforme as curas propostas em estudo.

Figura 12: Aparelho utilizado para medir a variação dimensional das amostras



Na norma efetuam-se as leituras e determinações de massa nas idades de 1, 7 e 28 dias. Porém, neste estudo, através da análise de outras literaturas, foram anotadas nos dias 1, 3, 28 e 63 dias. Este ensaio foi realizado para avaliar o efeito de diferentes dimensões das partículas do agregado miúdo, tanto natural quando reciclado, e o efeito da pré-molhagem dos agregados reciclados na variação dimensional da argamassa.

A variação dimensional foi calculada através da Equação 10:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (10)$$

Onde:

ε_i = é a medida da variação dimensional, caracterizada como retração (quando negativa) ou expansão (quando positiva), na idade “i”, em mm/m;

L_i = é a leitura efetuada nas amostras nas idades propostas no estudo, em mm;

L_0 = é a leitura efetuada após a desforma, em mm;

i = é a idade de leitura;

0,25 = distância linear entre os pinos.

A variação da massa foi calculada pela Equação 11:

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

m_i = é a massa na idade de cada amostra ao longo das leituras realizadas, em g;

m_0 = é a massa inicial da amostra, em g.

3.2.5 Etapa 5 - Comportamento microestrutural da argamassa

3.2.5.1 Isotermas de adsorção

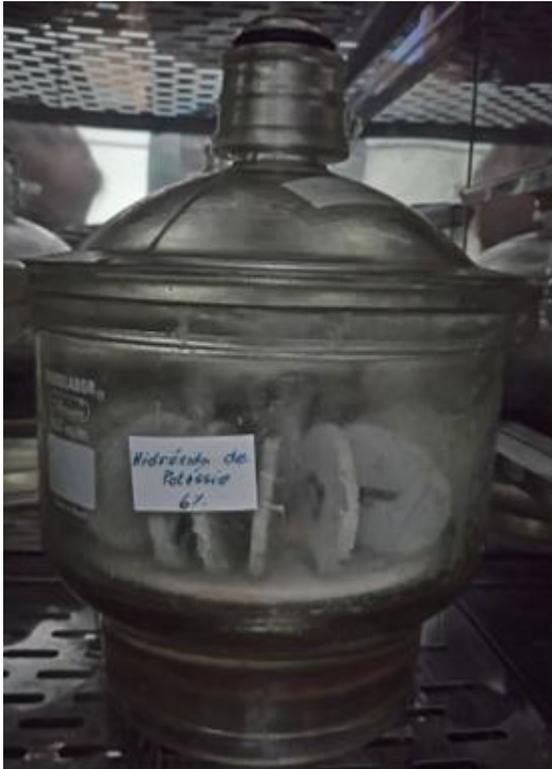
Foram abordadas neste estudo as isotermas de adsorção conforme preconiza a norma ASTM C1498. Para realizar o ensaio foram ensaiadas amostras de 5Ø x 10cm e deixadas em cura por 28 dias, após esse período, os corpos-de-prova foram cortados em espessuras entre 0,5 cm e 0,8 cm para que fossem secos em estufa a 50 °C, e então, inseridas em uma atmosfera de equilíbrio com solução salina saturada (dessecador), com um corpo de fundo para que a umidade relativa fosse constante (Figura

13). Através do método gravimétrico pôde-se determinar a quantidade de água adsorvida em diferentes umidades relativas no estado de equilíbrio.

Para determinar as isotermas de adsorção, foram empregados seis diferentes sais: hidróxido de potássio (KOH), cloreto de magnésio ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), bicromato de sódio ($Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$), nitrito de sódio ($NaNO_2$), cloreto de sódio (NaCl) e sulfato de potássio (K_2SO_4), os quais a uma temperatura de 50°C fornecem, respectivamente, os seguintes valores de umidade relativa: 6, 31, 47, 65, 75 e 96%. Em cada solução salina foram inseridas duas amostras de cada mistura com tipos de curas e condições de saturação dos agregados diferentes. Isto resultou em um total de 40 amostras para cada dessecador, ou seja, 240 amostras para a condição de pré-molhagem dos agregados e 200 amostras para condição seca dos agregados, totalizando assim, em 440 amostras ensaiadas e 220 misturas analisadas.

As pesagens das amostras foram realizadas em uma balança com precisão de 0,001 gramas. Para que os corpos-de-prova não tivessem perda de umidade, utilizou-se um recipiente com tampa onde as amostras ficaram mantidas enquanto o ensaio era executado, após anotar suas respectivas massas, retornavam para os dessecadores.

Figura 13: Dessecador com as amostras ensaiadas e umidade relativa de 6%



Com o modelo de GAB é possível encontrar a superfície específica (Se) do material estudado (Equação 12):

$$Se = \frac{N_{AVG} \times W_m \times \rho_s \times A_m}{V_m} \quad (12)$$

onde:

N_{AVG} = é o número de avogadro;

W_m = é o conteúdo mássico correspondente à formação de uma camada de moléculas recobrimdo toda a superfície sólida determinado através do modelo GAB;

ρ_s = é a massa específica aparente do material seco;

V_m = é o volume molar do adsorvato (água);

A_m = é a área de recobrimento de uma molécula adsorvida.

3.2.5.2 Absorção por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada através da norma NBR 9779 (2012). Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados e deixados em cura por 28 dias, após esse período, iniciou-se o ensaio, deixando os corpos-de-prova durante 48 horas na estufa a 50°C, anotando sua massa e então, colocou-se parte da amostra em contato com a água por 72 horas. Foram anotadas as massas das amostras nos tempos de 10 minutos, 90 minutos, 3h, 6h, 24h, 48h e 72h.

A absorção de água por capilaridade foi calculada através da Equação 13:

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (13)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

m_f = massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g;

m = massa do corpo-de-prova seco, assim que obtiver constância de massa, em g;

A_s = área da seção transversal, em cm².

Também foi realizado o cálculo do coeficiente de sorptividade das amostras, através da Equação 14:

$$X = S \times \sqrt{t} \quad (14)$$

X = volume do líquido absorvido por área da seção transversal da amostra (cm³/cm²);

S = coeficiente de sorptividade;

t = tempo (segundos).

3.2.5.3 Porosidade aberta

Por meio da NBR 9778 (2005) foi obtida a absorção de água por imersão, para o cálculo do índice de vazios e da massa específica da argamassa, em diferentes situações. As amostras foram adaptadas para a execução do ensaio, utilizando cilindros de aproximadamente 5Ø x 0,8cm. Para realização do cálculo, utilizou-se as mesmas amostras do ensaio de isotermas de adsorção (440 amostras), anotou-se as massas no estado seco, após saturação em água, imersas em água e saturação em fervura.

Através das seguintes equações foi calculada a porosidade aberta da amostra.

Cálculo da absorção (A), em porcentagem, pela Equação 15:

$$A_{\%} = \frac{m_{sat}-m}{m} \times 100 \quad (15)$$

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

m = é a massa da amostra seca em estufa a 105 °C, por 72 horas ou até constância da massa.

Cálculo do índice de vazios (I_v), em porcentagem, encontrado através da Equação 16:

$$I_v = \frac{m_{sat}-m}{m_{sat}-m_{si}} \times 100 \quad (16)$$

m_{si} = é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

Cálculo da massa específica da amostra seca (ρ_s), por meio da Equação 17:

$$\rho_s = \frac{m}{m_{sat}-m_{si}} \quad (17)$$

Cálculo da massa específica da amostra saturada após fervura (ρ_{sat}), encontrada através da Equação 18:

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat}-m_{si}} \quad (18)$$

Cálculo da massa específica real da amostra (ρ_r), através da Equação 19:

$$\rho_r = \frac{m}{m-m_{si}} \quad (19)$$

3.2.6 Análise Estatística

Para realizar a análise estatística das amostras, foi necessário utilizar fórmulas e métodos diferentes de avaliações, os quais serão descritos a seguir e um nível de confiabilidade de 95%.

O método de Bartlett, calcula a igualdade dos desvios das amostras, encontrando através de fórmulas, a Sc^2 (variância combinada), B, K_1 e SQG (soma dos quadrados dos resíduos das médias de cada grupo

com respeito à média total) as quais estão apresentadas através das seguintes equações:

$$Sc^2 = \sum_1^k (n_j - 1) x S_j^2 / (N - K) \quad (20)$$

$$B = 2,3026x(vx \log S_c^2 - \sum v_j x \log S_j^2) \quad (21)$$

$$K_1 = 1 + \sum \frac{1}{v_i} - \frac{1}{N-K} \quad (22)$$

$$SQG = \sum_j \frac{T_j^2}{n_j} - CT \quad (23)$$

Para que fosse aceita a hipótese de igualdade dos desvios de cada amostra, comparou-se o B/K_1 com o $\chi^2_{\alpha(K-1)}$ (este dado encontra-se por meio de tabela), se $\chi^2_{\alpha(K-1)}$ for maior que B/K_1 , aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios, caso contrário, rejeita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Também, avaliou-se se as médias das amostras tinham diferenças significativas quando comparadas suas variáveis. Para isso, utilizou-se o método de comparação das médias através da ANOVA, onde, calculou-se o MQR, MQG e F, através das seguintes equações:

$$MQR = SQR / (N - K) \quad (24)$$

$$MQG = SQG / (K - 1) \quad (25)$$

$$F = \frac{MQG}{MQR} \quad (26)$$

Ainda, para avaliar se as médias tinham diferença significativa, era preciso encontrar o valor de $F_{\alpha(K-1;N-K)}$ em uma tabela e compará-lo ao resultado de F. Caso F fosse maior que $F_{\alpha(K-1;N-K)}$ existe diferença significativa entre as médias.

Enfim, para que obtivesse uma avaliação completa da diferença entre as médias, realizou-se também o Método de DUNCAN, que compara as médias e permite identificar se uma difere significativamente da outra. Neste teste, calcula-se o S_{COMB} , S_x e o n_h , ou seja, o desvio combinado, a média dos desvios e o n_h que é a média harmônica dos n_i , através das equações apresentadas a seguir:

$$S_{com} = MQR \quad (27)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{S_{com}}{n_h}} \quad (28)$$

$$\frac{1}{n_h} = \frac{\sum \frac{1}{n_i}}{K} \quad (29)$$

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1 Massa Específica Seca e SSS

Os resultados da massa específica seca e na SSS foram obtidas através da média de três repetições. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Média da massa específica seca e SSS (picnômetro) e coeficiente de variação

		Média da massa específica (g/cm ³) e coeficiente de variação (%)									
Tipo do Agregado	Seco ou SSS	Dimensão das partículas (mm)									
		2,4		1,2		0,6		0,3		0,15	
		Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
Areia do IPT	Seco	2,64	0,12	2,61	0,50	2,60	0,12	2,56	1,64	2,54	0,29
	SSS	2,63	0,14	2,60	0,66	2,60	0,11	2,54	1,20	2,53	0,24
Agregado Reciclado de Concreto	Seco	2,44	0,694	2,43	0,657	2,38	1,18	2,28	0,9	2,35	0,56
	SSS	2,32	0,542	2,22	0,631	2,17	0,29	2,1	0,06	2,05	2,26
Agregado Reciclado de Cerâmica	Seco	2,46	1,986	2,38	2,385	2,38	2,03	2,59	1,73	2,3	0,86
	SSS	2,33	0,364	2,27	0,416	2,23	0,4	2,56	0,55	2,2	2,86
Agregado Leve (Argila Expandida)	Seco	1,11	0,797	1,27	0,258	1,46	2,21	1,81	0,4	2,02	0,82
	SSS	1,33	0,931	1,35	3,123	1,63	0,11	2,1	0,06	2,05	2,26

A areia do IPT não teve variação entre a massa específica seca e SSS por ser um material mais denso em relação aos outros e absorver uma quantidade de água menor. Os agregados reciclados de concreto e cerâmica conforme diminuíam o tamanho da partícula, diminuíam sua massa específica seca e SSS, estes agregados resultaram em massas específicas na SSS menores que no estado seco devido aos poros das partículas de SSS estarem preenchidas por água diminuindo assim a sua massa em relação à outra. Já o agregado leve (argila expandida) ao contrário dos outros materiais, conforme diminuíam a dimensão da partícula aumentava sua massa específica seca e SSS, isso pode ser explicado pela maior dimensão dos poros que influencia de maneira mais direta na massa específica nas partículas de maiores dimensões.

4.1.2 Absorção de água

Para encontrar a absorção de água dos agregados, foram ensaiadas duas amostras de cada material para que no fim fosse possível calcular a média dos resultados obtidos ($N = 2$). Estes resultados são apresentados na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9: Resultados da absorção de água e porosidade dos agregados

Tipo de Agregado	Dimensão (mm)	Média Absorção de água (%)	CV (%)
Referência	2,4	0,69	0,02
	1,2	0,80	0,01
	0,6	1,17	0,06
	0,3	0,48	0,01
	0,15	0,51	0,02
ARCN	2,4	7,71	0,02
	1,2	9,89	0,04
	0,6	11,11	0,03
	0,3	12,30	0,05
	0,15	11,44	0,07
ARCE	2,4	9,58	0,03
	1,2	9,26	0,01
	0,6	9,68	0,01
	0,3	9,60	0,02
	0,15	9,64	0,02
AL	2,4	38,18	0,06
	1,2	16,94	0,01
	0,6	21,72	0,01
	0,3	12,39	0,03
	0,15	11,44	0,02

A absorção de água da areia do IPT, como era previsto, obteve resultados muito próximos de zero. O agregado reciclado de concreto

conforme aumentava a dimensão da partícula diminuía a sua absorção, apenas a dimensão da partícula de 0,15mm que não obteve o mesmo comportamento. Para o agregado reciclado de cerâmica todas as dimensões das partículas obtiveram resultados parecidos em torno de 9% de absorção de água. E por fim o agregado leve (argila expandida) conforme aumentava a dimensão da partícula do agregado aumentava a sua absorção, apenas a dimensão da partícula de 0,6mm que não obteve o mesmo comportamento resultando em uma absorção de 21,72% e maior que a partícula de 1,2mm.

Muñoz-ruiperez et al. (2016) estudaram argamassas com agregados reciclados de concreto (RCA) de dimensão de 4mm e argila expandida com dimensões de 0,6mm e 0,3mm. Para o RCA obterão uma absorção de 2,4% e para a argila expandida de 26,2% e 24,9%. Se comparadas com os resultados encontrados no presente estudo, pode-se dizer que o RCA tem um comportamento parecido, ou seja, a absorção de água diminui com dimensões maiores das partículas dos agregados. O agregado de argila expandida resultou em uma absorção de água na dimensão de 0,6mm muito próxima da encontrada nesta pesquisa, porém na menor dimensão o resultado foi 2 vezes maior.

Com agregado reciclado de cerâmica, provenientes da reutilização de componentes utilizados em construções de paredes, Jiménez et al. (2013) ao realizar a caracterização do material encontrou resultados de absorção de água nas dimensões de 0-5mm de 9%, como os resultados obtidos no presente estudo.

Sendo assim, apesar dos agregados reciclados e de argila expandida apresentar grande variabilidade nas características físicas, ambos os estudos tiveram resultados próximos para a absorção de água dos materiais.

4.2 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

Conforme citado no item 3.2.2.1 foi realizado primeiramente o estudo nas argamassas com os agregados pré-molhados, após isso, foram selecionadas as dimensões que resultaram em uma maior resistência à compressão para que fossem realizados os ensaios com agregados secos. Por este motivo, os resultados das argamassas com agregados secos são apresentados nas dimensões das partículas de 2,4mm, 1,2mm e 0,6mm.

4.2.1 Trabalhabilidade

Na Tabela 10 são apresentadas as médias dos resultados do flow (espalhamento) no tempo inicial ($t = 0$ min.) das argamassas com a pré-molhagem dos agregados.

Tabela 10: Resultado do flow (espalhamento) de cada mistura com agregados pré-molhados

Flow (espalhamento)				
Mistura	Traço (cimento:agregado:água)	Abertura (mm)		Média (mm)
Referência	1:3:0,5	272	264	268
ARCN 2,4 M	1:3:0,5	238	243	240,5
ARCN 1,2 M	1:3:0,5	224	238	231
ARCN 0,6 M	1:3:0,5	233	228	230,5
ARCN 0,3 M	1:3:0,5	189	184	186,5
ARCN 0,15 M	1:3:0,5	243	252	247,5
ARCE 2,4 M	1:3:0,5	208	210	209
ARCE 1,2 M	1:3:0,5	215	220	217,5
ARCE 0,6 M	1:3:0,5	217	225	221
ARCE 0,3 M	1:3:0,5	210	218	214
ARCE 0,15 M	1:3:0,5	222	224	223
AL 2,4 M	1:3:0,5	180	180	180
AL 1,2 M	1:3:0,5	175	182	178,5
AL 0,6 M	1:3:0,5	187	186	186,5
AL 0,3 M	1:3:0,5	272	251	261,5
AL 0,15 M	1:3:0,5	241	233	237

Como as primeiras misturas realizadas foram as com a pré-molhagem do material, pôde-se perceber que quanto maior fosse a absorção de água do agregado reciclado ou agregado leve menor era o seu espalhamento. Isto porque com altas absorções do material tira-se parte da água da mistura para utilizá-la na pré-molhagem do agregado (reciclado ou leve), resultando assim, em uma quantidade pequena de água livre durante a mistura e em menores espalhamentos (Figura 14), se comparados com a argamassa referência onde nenhum agregado foi pré-molhado.

Figura 14: Flow (espalhamento) das misturas. (a) AL 0,6 M com pouca água livre na moldagem; (b) AL 0,6 S com água livre na moldagem.



(a)



(b)

A argamassa referência foi que resultou em uma maior abertura do flow (espalhamento) devido ao agregado natural, independente da dimensão da partícula, ter uma absorção de água próxima de zero deixando toda a água livre na mistura. Em relação aos agregados reciclados o que pôde-se observar para o ARCN foi que conforme diminuía a absorção de água do agregado, aumentava o flow (espalhamento) da argamassa. Apenas a dimensão da partícula de 0,15mm não resultou nesse comportamento, sendo que teve uma abertura maior até do que a dimensão de 2,4mm, dimensão essa, que teve a menor absorção de água e maior abertura comparada as outras. Para o ARCE o flow (espalhamento) da argamassa teve resultados muito próximos porque a absorção de água das diferentes dimensões dos agregados era

parecida. Já para o AL as primeiras dimensões 2,4mm, 1,2mm e 0,6mm, resultaram em flow (espalhamento) de aproximadamente 180mm devido à absorção de água ser elevada e não sobrar muita água livre para a mistura, as outras dimensões tiveram resultados parecidos com o ARCN e ARCE.

Na Tabela 11 estão dispostos os resultados das médias do flow (espalhamento) no tempo inicial ($t=0$ min.), das misturas com agregados secos.

Tabela 11: Resultado do flow (espalhamento) de cada mistura com agregados secos

Mistura	Flow (espalhamento)			Média (mm)
	Traço (em massa)	Abertura (mm)		
ARCN 2,4 S	1:3:0,5	223	228	225,5
ARCN 1,2 S	1:3:0,5	230	223	226,5
ARCN 0,6 S	1:3:0,5	205	199	202
ARCE 2,4 S	1:3:0,5	221	237	229
ARCE 1,2 S	1:3:0,5	233	242	237,5
ARCE 0,6 S	1:3:0,5	206	210	208
AL 2,4 S	1:3:0,5	248	220	234
AL 1,2 S	1:3:0,5	233	219	226
AL 0,6 S	1:3:0,5	213	206	209,5

Para as argamassas com agregados secos foi adicionada a mesma quantidade de água para cada mistura. Desta maneira, o flow (espalhamento) teve um comportamento semelhante nas dimensões das partículas de cada agregado, sendo que para todos os agregados a dimensão da partícula de 0,6mm resultou em flow (espalhamento) menor entre 202 a 210mm, se comparada com as outras dimensões.

4.2.2 Massa específica e ar incorporado

Os valores da massa específica e ar incorporado da argamassa no estado fresco para as misturas realizadas com agregados pré-molhados e secos, estão dispostos nas Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12: Resultados da massa específica e ar incorporado da argamassa no estado fresco com agregados molhados

Mistura	Massa Específica (g/cm³)	Massa Específica Teórica (g/cm³)	Ar Incorporado (%)
Referência	2,21	2,27	2,59
ARCN 2,4 M	2,21	2,24	1,24
ARCN 1,2 M	2,21	2,23	0,92
ARCN 0,6 M	2,21	2,22	0,55
ARCN 0,3 M	2,21	2,221	0,57
ARCN 0,15 M	2,21	2,21	0,34
ARCE 2,4 M	2,27	2,24	-1,44
ARCE 1,2 M	2,25	2,23	-0,78
ARCE 0,6 M	2,30	2,23	-3,33
ARCE 0,3 M	2,31	2,23	-3,16
ARCE 0,15 M	2,31	2,24	-3,10
AL 2,4 M	2,09	2,12	1,59
AL 1,2 M	2,14	2,13	-0,49
AL 0,6 M	2,10	2,16	2,72
AL 0,3 M	2,10	2,22	5,15
AL 0,15 M	2,17	2,22	1,94

Tabela 13: Resultados da massa específica e ar incorporado da argamassa no estado fresco com agregados secos

Mistura	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Específica Teórica (g/cm ³)	Ar Incorporado (%)
ARCN 2,4 S	2,26	2,24	-1,05
ARCN 1,2 S	2,26	2,23	-1,52
ARCN 0,6 S	2,23	2,22	-0,26
ARCE 2,4 S	2,27	2,24	-1,46
ARCE 1,2 S	2,25	2,23	-0,72
ARCE 0,6 S	2,28	2,23	-2,07
AL 2,4 S	2,07	2,12	2,51
AL 1,2 S	2,09	2,13	1,55
AL 0,6 S	2,11	2,16	2,47

Nas argamassas com agregados pré-molhados e secos pôde-se perceber que os resultados de massa específica não variam muito entre si, se comparar um mesmo agregado com dimensões das partículas diferentes. Já quando comparadas diferentes agregados, pôde-se visualizar que as argamassas com 20% de substituição de ARCN em relação à argamassa referência obtiveram resultados praticamente iguais. O ARCE apresentou massa específica aparente da argamassa no estado fresco maior em relação à referência e o AL teve resultados menores em comparação a essa mesma argamassa.

O ar incorporado resultou em valores próximos de 0 ou até mesmo negativos. Estes resultados são calculados através da massa específica teórica e a massa específica real (medida na hora que a mistura é realizada), sendo que, no cálculo da massa específica teórica não é levado em consideração o volume de água absorvido pelos agregados durante a mistura, onde este volume absorvido que antes fazia parte do volume da massa teórica, deixa de contribuir para o volume da argamassa podendo resultar em uma densidade maior na massa específica real. Este comportamento pode ser explicado pela presença de poros nos agregados reciclados e leves.

Comparando as misturas de ARCN M e ARCN S há uma queda no teor de ar incorporado quando o agregado se encontra no estado seco durante a mistura, isto, pode ser explicado, pela alta absorção inicial deste

agregado que absorve parte da água da mistura para os poros em seu interior. Com as misturas ARCE M e ARCE S não foi diferente, porém quando o agregado é pré-molhado e parte da água da mistura já está em seus poros, o teor de ar incorporado diminui ainda mais em relação ao agregado seco, diferente do que aconteceu para as misturas com ARCN. Agora em relação ao agregado leve, apesar de ter uma absorção de água superior aos agregados reciclados, o ar incorporado apresentou resultados positivos isso porque os poros dos agregados leves apresentam uma absorção de água mais lenta na hora da mistura comparada aos agregados reciclados.

4.3 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA O ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à compressão e resistência à flexão

Os gráficos a seguir apresentam os resultados da resistência à compressão média (N= 6 amostras). Cada gráfico esboça as misturas ARCN, ARCE e AL, com dimensões das partículas diferentes, comparadas à referência, em ambos os tipos de cura (47% HR e autógena) e com agregados (reciclados e leves) pré-molhados e secos.

Na Figura 15 pode-se observar o comportamento referente à resistência à compressão das argamassas de ARCN com diferentes dimensões das partículas, cura autógena e pré-molhagem dos agregados. As partículas de dimensão 2,4mm foram as únicas que resultaram em uma resistência menor se comparadas com a argamassa referência. Já as outras dimensões resultaram em ganhos de resistência de até 11,64%. Na Figura 16 foi alterado apenas o tipo de cura da argamassa da cura autógena para cura a 47% HR, tendo um resultado inverso da cura utilizada anteriormente. Dessa forma, nenhuma mistura se sobressaiu em relação a argamassa de referência, sendo que a mistura de dimensão 2,4mm obteve resultado mais próximo à argamassa de referência, se comparado às outras dimensões, diminuindo sua resistência em apenas 4,19%.

Figura 15: Resistência à compressão da argamassa ARCn com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e pré-molhagem)

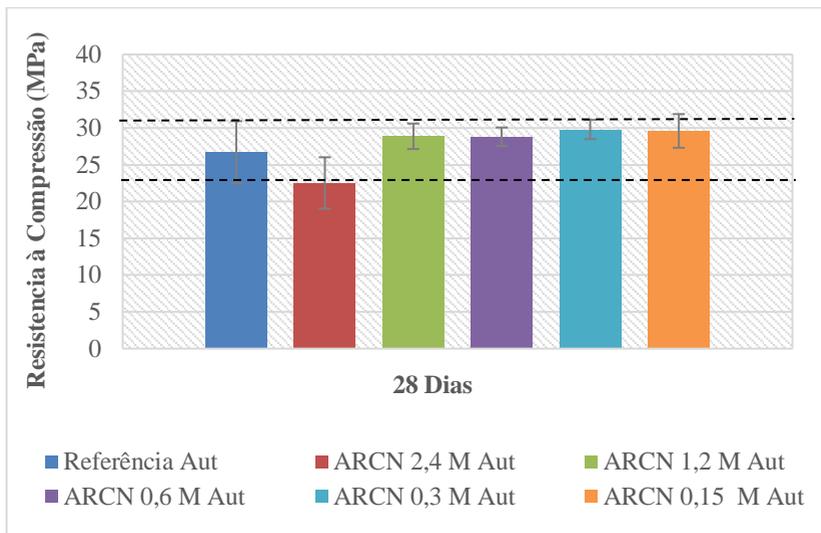
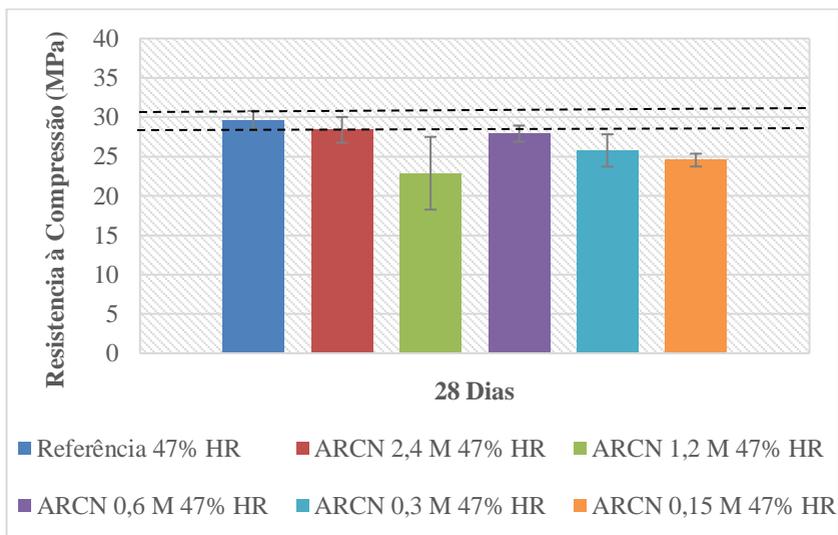


Figura 16: Resistência à compressão da argamassa ARCn com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e pré-molhagem)



A Figura 17 apresenta as misturas com ARCE de diferentes dimensões, cura autógena e pré-molhagem dos agregados. As dimensões das partículas de 1,2mm e 0,6mm resultaram em um ganho de resistência à compressão de 22,84% e 13,02%, respectivamente, comparadas à argamassa de referência, já as dimensões das partículas de 2,4mm, 0,3mm e 0,15mm, obtiveram resultados inferiores. Na Figura 18 modificou-se apenas o tipo de cura aplicada na argamassa de cura autógena para cura a 47% HR. Neste caso a dimensão que se sobressaiu comparada à argamassa referência foi a de 2,4mm com um ganho de 7,08%, sendo que a dimensão de 1,2mm resultou em uma resistência muito próxima à referência e a dimensão de 0,6mm resultou em uma resistência de apenas 0,35% menor em relação à referência. Já as dimensões de 0,3mm e 0,15mm resultaram em uma resistência à compressão menor em relação as demais.

Figura 17: Resistência à compressão da argamassa ARCE com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e pré-molhagem)

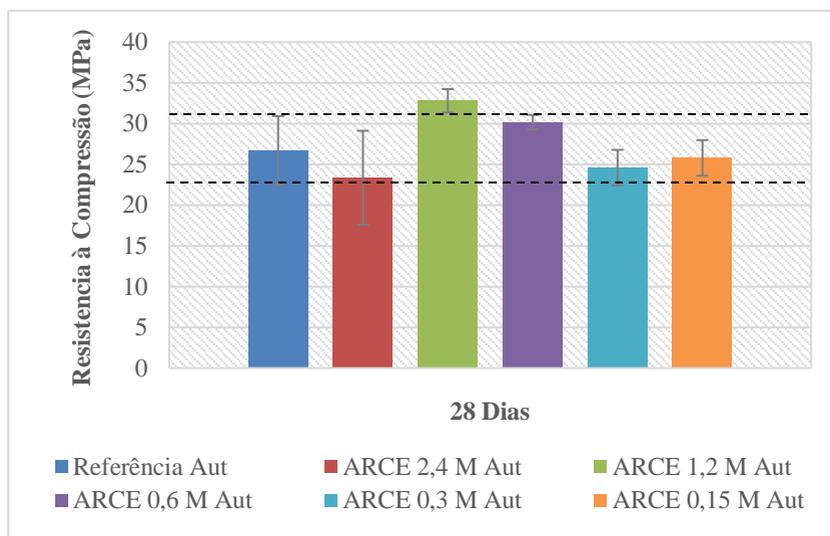
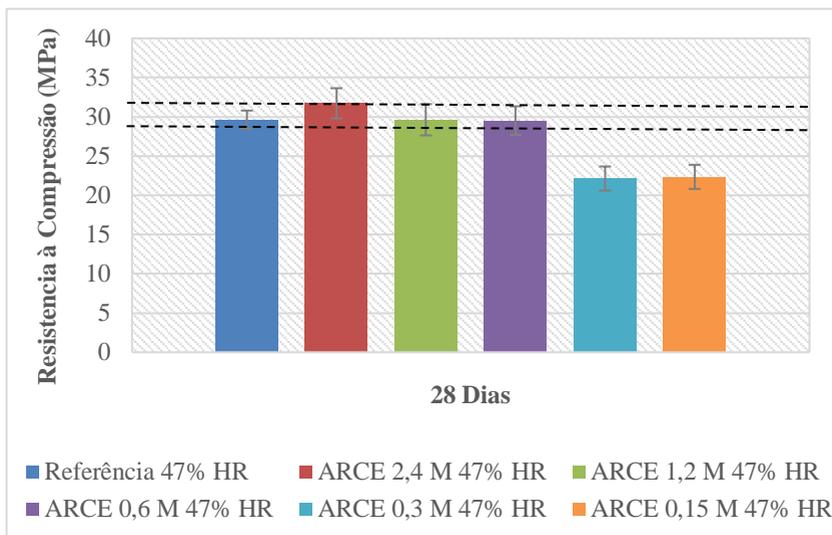


Figura 18: Resistência à compressão da argamassa ARCE com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e pré-molhagem)



A Figura 19 apresenta o gráfico com os resultados das misturas com AL de dimensões diferentes, com cura autógena e pré-molhagem dos agregados. A dimensão da partícula de 2,4mm foi a única que resultou em resistência maior do que a argamassa referência, com um ganho de 1,21%. As demais dimensões apresentaram resultados inferiores, sendo que nas dimensões de 0,3mm e 0,15mm tiveram reduções de até 31,24%. Na Figura 20 modificou-se apenas o tipo de cura aplicada na argamassa de cura autógena para cura a 47% HR. Nesse caso todas as misturas resultaram em resistências à compressão inferiores à argamassa referência, sendo que as menores dimensões de 0,3 e 0,15mm apresentaram as menores resistências com reduções de até 60%.

Figura 19: Resistência à compressão da argamassa AL com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e pré-molhagem)

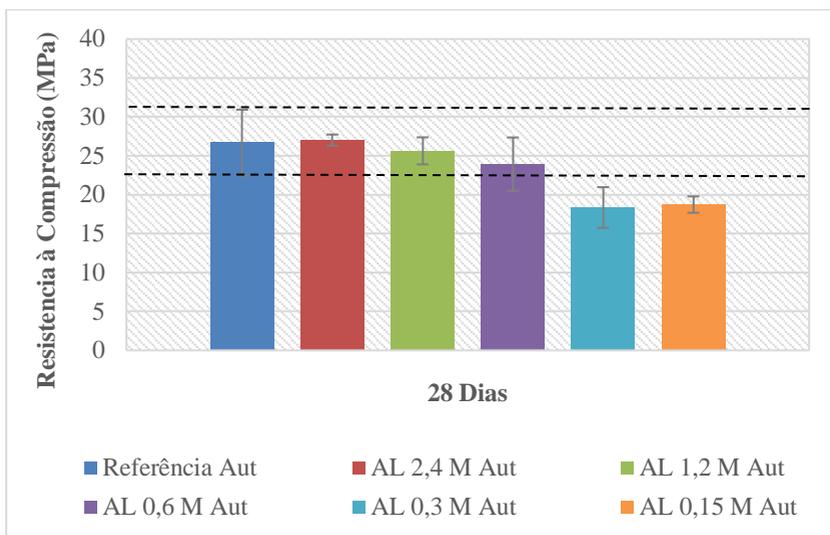
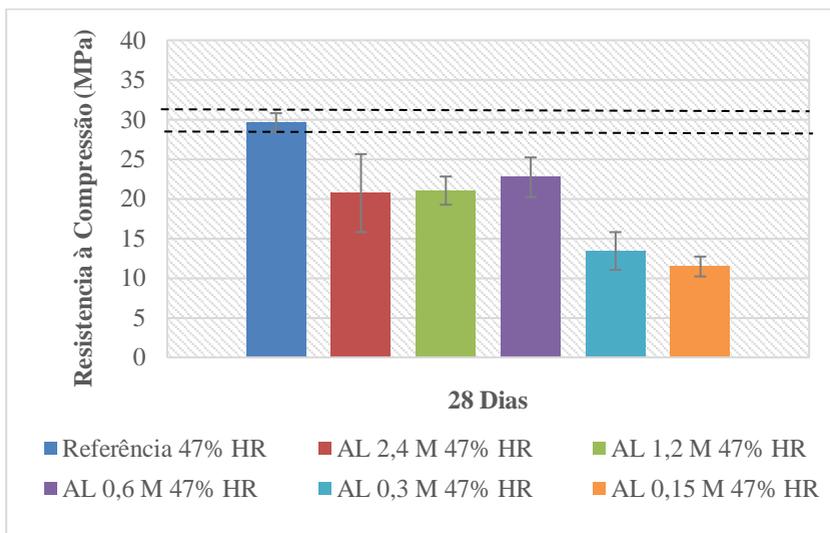


Figura 20: Resistência à compressão da argamassa AL com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e pré-molhagem)



Em relação ao tipo de cura, a resistência à compressão da argamassa referência, com cura autógena, resultou em uma perda de 9,91% se comparada à referência com cura a 47% HR. O mesmo não se pode dizer quando se utiliza agregado reciclado e leve. Com dimensão da partícula de 0,6mm e 1,2mm as argamassas com cura autógena tiveram ganhos de resistência à compressão. Estes ganhos percentuais comparados à cura de 47% HR foram de: 3,12% no ARCN 0,6; 2,13% no ARCE 0,6; 5% no AL 0,6; 20,75% no ARCN 1,2; 9,63% no ARCE 1,2; 17,93% AL 1,2. Porém, com a maior dimensão de partícula (2,4mm) esta mesma cura autógena apresentou reduções na resistência à compressão nas argamassas ARCN 2,4 e ARCE 2,4 de 20,65% e 26,41%, respectivamente, sendo que, somente a mistura AL 2,4 resultou em um ganho de 23,28%.

Como na maioria das amostras, as dimensões de 0,3mm e 0,15mm resultaram em um menor desempenho mecânico, optou-se por realizar os ensaios seguintes com as maiores dimensões das partículas, ou seja, as dimensões de 2,4mm, 1,2mm e 0,6mm.

A Figura 21 apresenta o gráfico dos resultados das misturas de ARCN com dimensões das partículas diferentes, cura autógena e agregados secos. Todas as misturas resultaram em um ganho de resistência à compressão, sendo que à argamassa com dimensão da partícula de 2,4mm teve 9,89% de aumento comparada a argamassa de referência. Na Figura 22 onde apenas o tipo de cura utilizado nas argamassas foi alterado (de cura autógena para cura a 47% HR), todas as misturas resultaram em resistência à compressão inferior comparadas à argamassa de referência.

Figura 21: Resistência à compressão da argamassa ARCN com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e agregados secos)

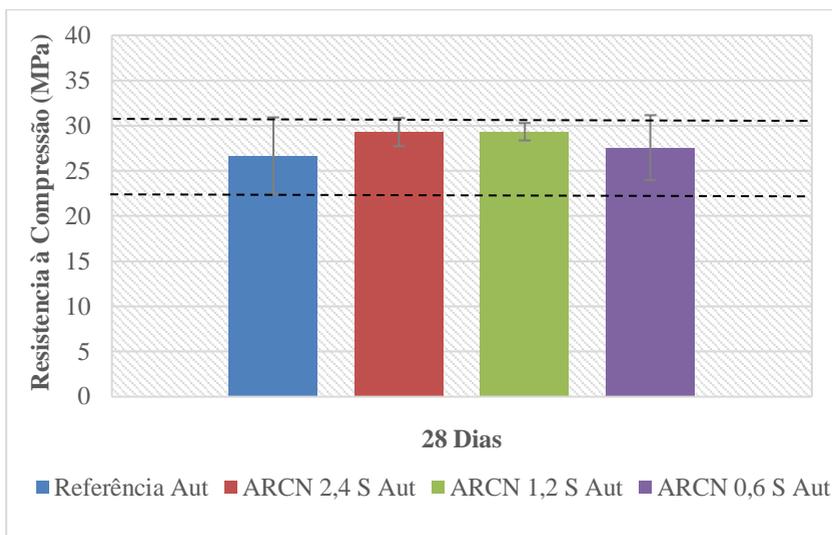
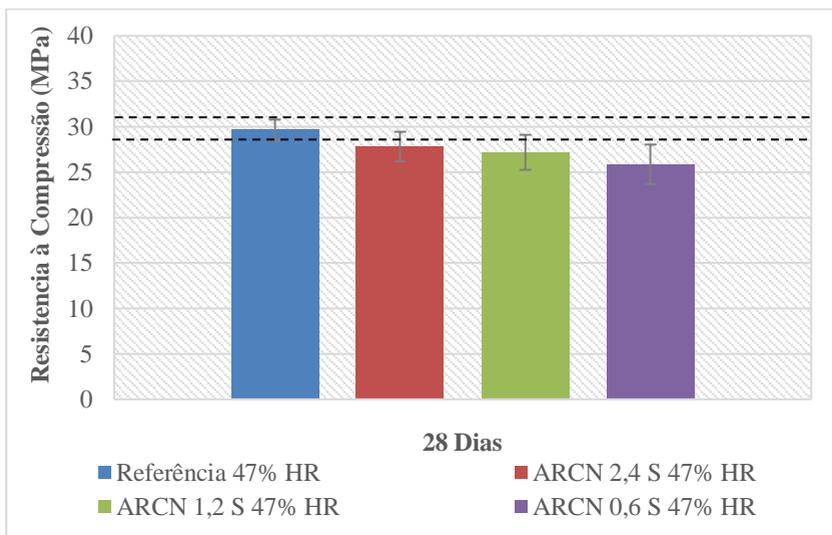


Figura 22: Resistência à compressão da argamassa ARCN com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e agregados secos)



Na Figura 23 apresentam-se os resultados de resistência à compressão das misturas ARCE com dimensões das partículas diferentes, cura autógena e agregados secos. Pode-se perceber que todas as misturas resultaram em resistências superiores se comparadas à argamassa de referência, resultando em um ganho de até 15,38%, como no caso da amostra ARCE 1,2 S AUT. No caso da Figura 24, onde apenas o tipo de cura se altera (de cura autógena para cura a 47% HR), a mistura com dimensão da partícula de 0,6mm resultou em uma perda na resistência de 5,7% em comparação à argamassa de referência. Já as outras dimensões (2,4mm e 1,2mm) obtiveram ganho de resistência de até 4,04% também se comparadas à argamassa referência.

Figura 23: Resistência à compressão da argamassa de referência em comparação às misturas ARCE com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e agregados secos)

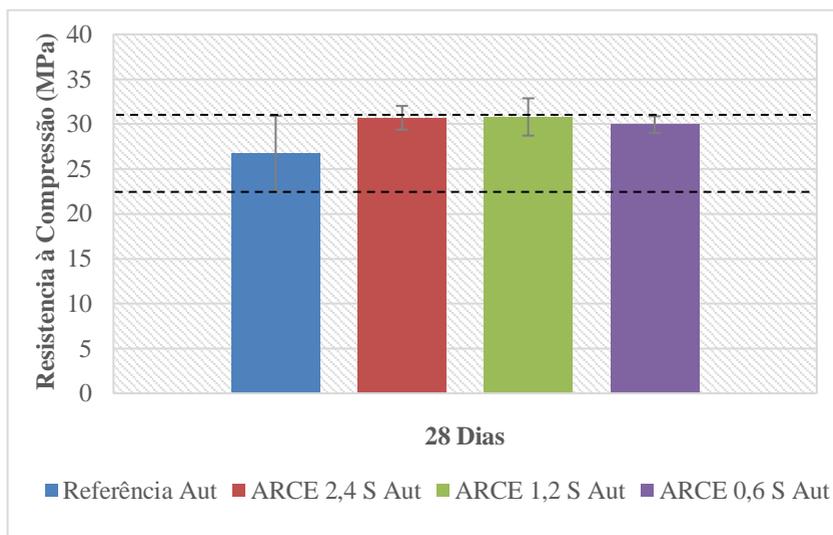
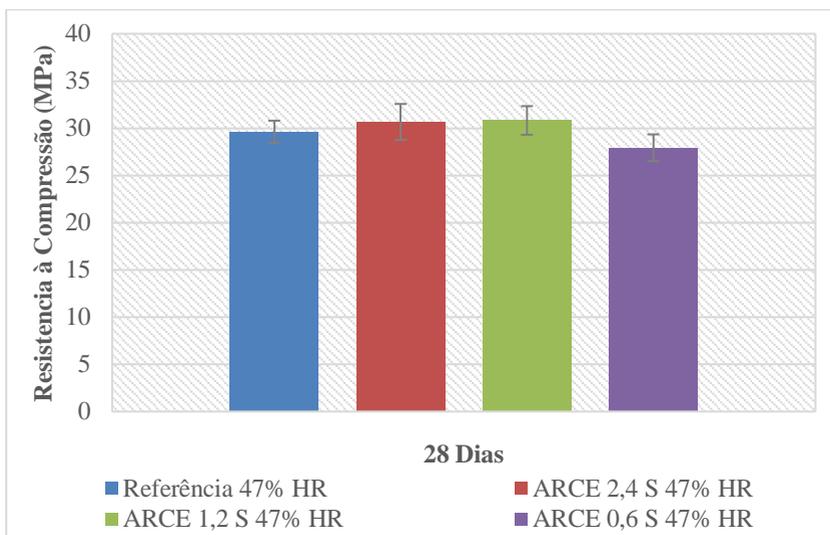


Figura 24: Resistência à compressão da argamassa ARCE com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e agregados secos)



Na Figura 25 o gráfico compara a resistência à compressão das misturas AL com diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados secos. Apenas a mistura de dimensão da partícula de 0,6mm resultou em um ganho de 2,01% de resistência comparada a argamassa de referência, sendo que a mistura AL 2,4 S AUT resultou no pior desempenho mecânico. No caso da Figura 26, onde altera-se o tipo de cura das misturas (de cura autógena para cura a 47% HR), nenhuma argamassa resultou em valores superiores de resistência comparadas com a argamassa referência e ao contrário dos resultados da cura autógena, a mistura AL 2,4 S 47% HR resultou em um melhor desempenho comparada as demais dimensões.

Figura 25: Resistência à compressão da argamassa AL com diferentes dimensões da partícula (cura autógena e agregados secos)

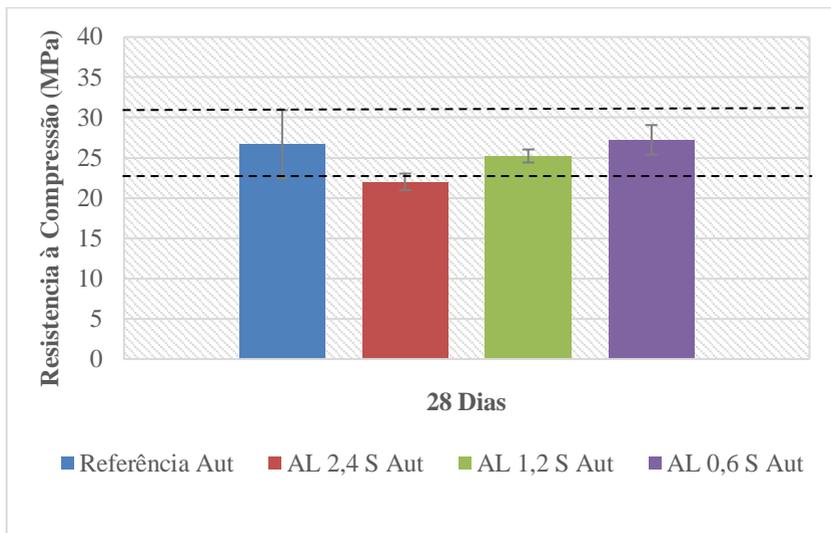
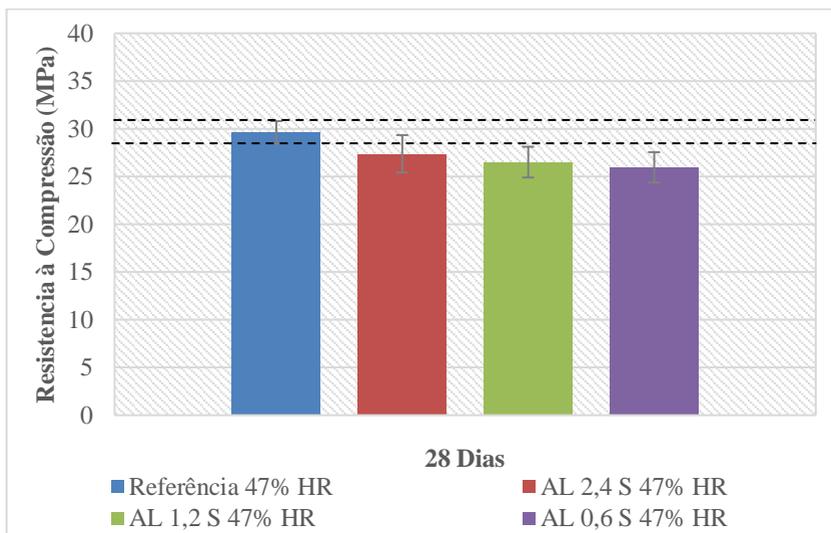


Figura 26: Resistência à compressão da argamassa AL com diferentes dimensões da partícula (cura à 47% HR e agregados secos)



Em relação ao tipo de cura das argamassas, houve um comportamento inverso às argamassas de referência quando utilizados agregados reciclados e leve. Para as misturas de ARCN com dimensões da partícula de 2,4mm, 1,2mm e 0,6mm, ARCE com dimensões da partícula de 2,4 mm e 0,6 mm e AL com dimensão da partícula de 0,6mm, com cura autógena, as argamassas resultaram em um ganho de resistência à compressão de até 15%, se comparadas com as argamassa de cura a 47% HR. Já para a mistura de ARCE 1,2 mm na cura autógena, teve uma perda de resistência comparada a de cura a 47% HR de 0,09%, muito pequena se comparada as outras misturas com o agregado leve (AL 2,4 e AL 1,2) onde essa perda chegou à 19,33%.

Conforme Jiménez et al. (2013) constataram, argamassas com substituições de até 40% do agregado natural pelo agregado reciclado, não apresentariam grande perda de resistência mecânica nas argamassas. Isso pode ser verificado através dos resultados encontrados, sendo que com substituições de 20% do agregado natural pelo agregado reciclado, não resultou em perda de resistência à compressão significativas, onde as mesmas, na maior parte dos resultados se encontravam dentro da barra de erros.

Para as argamassas com agregados leves, como Nepomuceno e Silva (2014), encontrou-se valores menores de resistência à compressão quando comparadas a argamassa de referência. As argamassas com agregados leves submetidas a cura autógena, tiveram resistência à compressão dentro da barra de erros da argamassa de referência, já com a cura à 47% HR estas resistências foram menores, resultando em um pior desempenho mecânico.

Os resultados de resistência à flexão foram encontrados a partir da média de 3 amostras, para as misturas de diferentes curas e agregados na condição de pré-molhagem ou secos, estão apresentadas na Tabela 14 e Tabela 15.

Tabela 14: Resistência à flexão das amostras com agregados pré-molhados

Resistência à Flexão (MPa)		
Misturas	Tipos de cura	
	Autógena	47% HR
Referência	1,93	1,97
ARCN 2,4 M	1,88	1,90
ARCN 1,2 M	2,05	2,01
ARCN 0,6 M	2,03	1,72
ARCN 0,3 M	1,88	2,00
ARCN 0,15 M	1,89	1,86
ARCE 2,4 M	2,09	2,00
ARCE 1,2 M	1,81	1,89
ARCE 0,6 M	1,77	1,68
ARCE 0,3 M	1,88	1,73
ARCE 0,15 M	1,88	1,74
AL 2,4 M	1,60	1,84
AL 1,2 M	1,74	1,83
AL 0,6 M	1,76	1,77
AL 0,3 M	1,32	1,32
AL 0,15 M	1,43	1,10

Tabela 15: Resistência à flexão das amostras com agregados secos

Resistência à Flexão (MPa)		
Misturas	Tipos de cura	
	Autógena	47% HR
Referência	1,93	1,97
ARCN 2,4 S	1,72	2,01
ARCN 1,2 S	1,87	1,75
ARCN 0,6 S	1,90	1,82
ARCE 2,4 S	1,83	1,84
ARCE 1,2 S	1,80	1,64
ARCE 0,6 S	1,83	1,73
AL 2,4 S	1,47	1,91
AL 1,2 S	1,55	1,78
AL 0,6 S	1,67	1,70

No que se refere à resistência à flexão, os valores não variaram muito entre eles, independente da mistura realizada, sendo que, conforme aumenta a resistência à compressão, aumenta também a resistência à flexão das argamassas. Para Zhao et al. (2015) utilizando agregados reciclados em substituição da areia natural, a variação da resistência à flexão também teve resultados muito próximos, independente do agregado utilizado e da condição de saturação.

4.3.2 Análise Estatística ANOVA – Resistência à compressão

Para uma melhor avaliação dos resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão das argamassas, foi realizada uma análise estatística através do método da ANOVA. Para isso, foram analisadas quatro diferentes variáveis do estudo, sendo elas: dimensão da partícula; tipo de cura; tipo de agregado; condição de molhagem dos agregados. Desta maneira, pôde-se avaliar, quais dessas variáveis tiveram influência significativa nos resultados obtidos.

Na Tabela 16 estão as médias, desvio padrão e número de amostras, que foram utilizadas para o cálculo da ANOVA de cada uma das misturas.

Tabela 16: Dados gerais para cálculo da ANOVA das amostras de resistência à compressão

AMOSTRA	N	MÉDIA	DESVIO P.
ARCN 2,4 M 47% HR	6	28,38	1,64
ARCN 2,4 M AUT	6	22,52	3,50
ARCN 2,4 S 47% HR	6	27,82	1,63
ARCN 2,4 S AUT	6	29,29	1,56
ARCN 1,2 M 47% HR	6	22,88	4,62
ARCN 1,2 M AUT	5	28,87	1,73
ARCN 1,2 S 47% HR	6	27,18	1,93
ARCN 1,2 S AUT	5	29,33	0,96
ARCN 0,6 M 47% HR	6	27,91	1,03
ARCN 0,6 M AUT	6	28,80	1,26
ARCN 0,6 S 47% HR	6	25,86	2,18
ARCN 0,6 S AUT	6	27,57	3,59
ARCE 2,4 M 47% HR	6	31,73	1,92
ARCE 2,4 M AUT	6	23,35	5,76
ARCE 2,4 S 47% HR	6	30,67	1,91
ARCE 2,4 S AUT	6	30,70	1,32
ARCE 1,2 M 47% HR	5	29,63	1,99
ARCE 1,2 M AUT	6	23,79	1,44
ARCE 1,2 S 47% HR	5	30,83	1,52
ARCE 1,2 S AUT	6	30,80	2,08
ARCE 0,6 M 47% HR	6	29,52	1,82
ARCE 0,6 M AUT	6	30,17	0,89
ARCE 0,6 S 47% HR	6	27,94	1,42
ARCE 0,6 S AUT	6	29,95	0,93
AL 2,4 M 47% HR	6	20,72	4,92
AL 2,4 M AUT	5	27,01	0,72
AL 2,4 S 47% HR	6	27,38	1,96
AL 2,4 S AUT	5	22,01	1,04
AL 1,2 M 47% HR	5	21,04	1,78

AL 1,2 M AUT	6	25,63	1,74
AL 1,2 S 47% HR	5	26,51	1,61
AL 1,2 S AUT	6	25,22	0,81
AL 0,6 M 47% HR	6	22,72	2,50
AL 0,6 M AUT	6	23,92	3,43
AL 0,6 S 47% HR	6	25,96	1,59
AL 0,6 S AUT	6	27,23	1,83

Nos próximos itens, serão apresentados os valores encontrados para cada variável no cálculo da ANOVA e se os mesmos, influenciam significativamente a resistência à compressão das argamassas.

4.3.2.1 Tipos de Curas

Para que fosse possível avaliar a influência das curas autógena e à 47% de HR, comparou-se, argamassas com substituição de dimensões das partículas iguais, mesmas condições de saturação dos agregados e mesmo tipo de agregado utilizado. Assim, pôde-se concluir se a cura tinha influência significativa nas amostras ensaiadas.

Na Tabela 30 do anexo estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação ao tipo de cura. Na maior parte das misturas aceita-se a igualdade dos desvios, apenas as misturas de AL 2,4 M e ARCE 2,4 M, que não seguiram o mesmo comportamento.

Na Tabela 17 realizou-se a comparação das médias através do método da ANOVA. O que pode-se concluir, é que o tipo de cura teve maior influência quando utilizada a pré-molhagem dos agregados reciclados e leves, sendo que apenas duas amostras sem a pré-molhagem dos agregados, resultaram em diferença significativa das médias. Quando houve a pré-molhagem dos agregados, apenas as misturas com dimensão da partícula de 0,6mm não resultaram em diferença significativa das médias, as demais, todas diferiram.

Tabela 17: Comparação das médias (ANOVA) para os diferentes tipos de cura no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	MQR	MQG	F		$F_{\alpha(K-1;N-K)}$	DIFERENÇA
ARCN 2,4 M	7,46	103,09	13,82	>	4,96	EDSM
ARCN 2,4 S	2,54	6,43	2,53	<	4,96	NDSM
ARCN 1,2 M	13,21	97,92	7,41	>	5,12	EDSM
ARCN 1,2 S	2,33	13,87	5,96	>	4,96	EDSM
ARCN 0,6 M	1,32	2,40	1,82	<	4,96	NDSM
ARCN 0,6 S	8,83	8,70	0,99	>	4,96	NDSM
ARCE 2,4 M	18,46	210,67	11,41	>	4,96	EDSM
ARCE 2,4 S	2,68	0,01	0,01	<	4,96	NDSM
ARCE 1,2 M	2,92	93,14	31,91	>	5,12	EDSM
ARCE 1,2 S	3,43	0,01	0,00	<	5,12	NDSM
ARCE 0,6 M	2,06	1,24	0,60	>	4,96	NDSM
ARCE 0,6 S	1,43	12,22	8,52	>	4,96	EDSM
AL 2,4 M	13,66	107,90	7,89	>	5,12	EDSM
AL 2,4 S	2,60	78,85	30,29	<	5,12	NDSM
AL 1,2 M	3,08	57,58	18,71	>	5,12	EDSM
AL 1,2 S	1,52	4,50	2,96	<<	5,12	NDSM
AL 0,6 M	8,99	4,31	0,48	>>	4,96	NDSM
AL 0,6 S	2,94	4,82	1,64	<<	4,96	NDSM

EDMS – Existe diferença significativa entre as médias;

NDSM – Não existe diferença significativa entre as médias.

Ainda, para que fosse possível obter uma avaliação mais confiável das médias, realizou-se a avaliação pelo método DUNCAN, e encontram-se os resultados na Tabela 31 do anexo. Através desse método, pôde-se confirmar os resultados obtidos anteriormente, onde, os agregados com a pré-molhagem apresentaram maior influência dos tipos de cura, em relação aos agregados secos.

Desta maneira, pode-se concluir que os tipos de cura têm influência significativa nas argamassas, principalmente, quando estas, são ensaiadas com agregados pré-molhados. Como visto anteriormente, a análise estatística, comprovou os resultados obtidos na resistência à

compressão, onde, mesmas misturas com tipos de curas diferentes tiveram resultados distintos e até mesmo contrários uma da outra, o mesmo, ocorreu em relação a pré-molhagem do agregado, porém, com diferenças menos expressivas.

4.3.2.2 *Dimensões das partículas*

Para avaliar a influência das diferentes dimensões das partículas utilizadas nas argamassas, comparou-se, argamassas com tipos de curas iguais, mesmas condições de saturação dos agregados e mesmo tipo de agregado utilizado. Desta maneira, pode-se concluir se as diferentes dimensões das partículas tinham influência significativa nas amostras ensaiadas.

Na Tabela 32 do anexo apresentou-se os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nos desvios de cada amostra, em relação as diferentes dimensões das partículas. Sendo que, apenas duas amostras apresentaram desigualdades nos desvios, a ARCN M 47% HR e a ARCE M AUT, ambas com a pré-molhagem dos agregados.

Em relação as médias das amostras pelo método da ANOVA, não pode-se obter uma análise muito completa, pois os comportamentos diferenciaram, independente do tipo de cura, tipo de agregado ou da pré-molhagem ou não do agregado. Estes valores, podem ser visualizados na Tabela 18.

Tabela 18: Comparação das médias (ANOVA) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	MQR	MQG	F		$F_{\alpha(K-1;N-K)}$	DIFERENÇA
ARCN M 47% HR	8,38	55,86	6,67	>	3,68	EDSM
ARCN M AUT	5,79	77,36	13,36	>	3,74	EDSM
ARCN S 47% HR	3,71	5,99	1,62	<	3,68	NDSM
ARCN S AUT	5,74	5,90	1,03	<	3,74	NDSM
ARCE M 47% HR	3,64	9,02	2,48	<	3,74	NDSM
ARCE M AUT	12,03	87,39	7,26	>	3,68	EDSM
ARCE S 47% HR	2,67	15,29	5,72	>	3,74	EDSM
ARCE S AUT	2,31	1,28	0,55	<	3,68	NDSM
AL M 47% HR	11,76	6,82	0,58	<	3,74	NDSM
AL M AUT	5,43	13,23	2,44	<	3,74	NDSM
AL S 47% HR	3,01	3,08	1,02	<	3,74	NDSM
AL S AUT	1,74	37,46	21,51	>	3,74	EDSM

EDMS – Existe diferença significativa entre as médias;
 NDSM – Não existe diferença significativa entre as médias.

Desta forma, o método de DUNCAN, permitiu obter uma avaliação mais completa em relação as diferentes dimensões das partículas utilizadas no estudo. Estes resultados, estão apresentados no anexo na Tabela 33.

As amostras com ARCN M, apresentaram o mesmo comportamento, independente do tipo de cura utilizado, sendo que, a dimensão da partícula de 0,6mm, resultou em diferença significativa comparada com as dimensões de 2,4mm e 1,2mm. No caso da amostra de ARCN S, também apresentaram o mesmo comportamento, independente do tipo de cura utilizado, onde as amostras não diferiram significativamente umas das outras.

Para as amostras com agregados ARCE, cada tipo de mistura teve resultados diferentes. Quando utilizado ARCE M 47% HR, as dimensões das partículas não diferiram significativamente, o mesmo não aconteceu quando alterou-se o tipo de cura. Para a amostra de ARCE M AUT, a dimensão da partícula que diferiu significativamente, foi a de 1,2mm. Com os agregados de ARCE na condição de saturação seca, os tipos de

cura tiveram comportamentos diferentes, sendo que quando utilizada a cura à 47% HR, a dimensão da partícula de 0,6mm diferiu significativamente das demais, e em relação a cura autógena, as dimensões não tiveram diferença significativa. Por último, avaliou-se as amostras com agregados leves, os quais, não resultaram em diferença significativa das médias em nenhum dos casos.

Com esta análise, pode-se constatar, que a dimensão da partícula que mais diferiu significativamente das demais, foi a de 0,6mm. E que, as amostras com agregados leves, não tiveram influência do tipo de dimensão utilizada na argamassa.

4.3.2.3 *Pré-molhagem ou secagem dos agregados*

Para avaliar a influência da pré-molhagem ou secagem utilizada nos agregados, comparou-se, argamassas com tipos de curas iguais, mesmas dimensões das partículas dos agregados e mesmo tipo de agregado. Desta maneira, pode-se concluir se a pré-molhagem tinha influência significativa nas amostras ensaiadas.

Na Tabela 34 do anexo, apresentou-se os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação a pré-molhagem e secagem dos agregados. Sendo que, apenas uma amostra apresentou desigualdade nos desvios, a ARCE M AUT, como já apresentado anteriormente, nas outras comparações realizadas, onde obteve o mesmo resultado.

Em relação as médias das amostras pelo método da ANOVA, das 18 amostras apresentadas na tabela, 8 delas diferem significativamente umas das outras em relação a pré-molhagem. Porém, ligado a isso, pode-se perceber, que seis, das nove comparações entre os diferentes tipos de cura, diferem significativamente, como pode ser visualizado na Tabela 19.

Tabela 19: Comparação das médias (ANOVA) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	MQR	MQG	F	$F_{\alpha(K-1;N-K)}$	DIFERENÇA
ARCN 2,4 47% HR	2,67	0,94	0,35	< 4,96	NDSM
ARCN 2,4 AUT	7,32	137,38	18,76	> 4,96	EDSM
ARCN 1,2 47% HR	12,55	55,62	4,43	> 4,96	EDSM
ARCN 1,2 AUT	1,96	0,54	0,27	< 5,32	NDSM
ARCN 0,6 47% HR	2,90	12,56	4,33	< 4,96	NDSM
ARCN 0,6 AUT	7,25	4,59	0,63	< 4,96	NDSM
ARCE 2,4 47% HR	3,66	3,36	0,92	< 4,96	NDSM
ARCE 2,4 AUT	17,48	162,38	9,29	> 4,96	EDSM
ARCE 1,2 47% HR	3,14	3,57	1,14	< 5,32	NDSM
ARCE 1,2 AUT	3,20	147,38	46,06	> 4,96	EDSM
ARCE 0,6 47% HR	2,67	7,56	2,83	< 4,96	NDSM
ARCE 0,6 AUT	0,82	0,13	0,16	< 4,96	NDSM
AL 2,4 47% HR	14,00	132,99	9,49	> 4,96	EDSM
AL 2,4 AUT	0,79	62,73	78,93	> 5,32	EDSM
AL 1,2 47% HR	2,88	74,80	26,01	> 5,32	EDSM
AL 1,2 AUT	1,84	0,50	0,27	< 4,96	NDSM
AL 0,6 47% HR	4,38	31,45	7,19	> 4,96	EDSM
AL 0,6 AUT	7,56	32,83	4,34	< 4,96	NDSM

EDMS – Existe diferença significativa entre as médias;
 NDSM – Não existe diferença significativa entre as médias.

Além disso, para que fosse possível obter uma avaliação mais confiável das médias, realizou-se a avaliação pelo método DUNCAN, apresentada na Tabela 35 presente no anexo desta dissertação. Com este método, pôde-se confirmar os resultados obtidos anteriormente, no qual, apenas uma amostra obteve resultado distinto, que foi a ARCN 1,2 47% HR.

Após análise de ANOVA e DUNCAN, pôde-se concluir, que a pré-molhagem dos agregados e o tipo de cura utilizado, como já dito anteriormente, tem influência significativa nos resultados encontrados de

resistência à compressão das argamassas. Isto, também pode ser visualizado, nos gráficos de resistência à compressão do capítulo anterior.

4.3.2.4 *Tipos de agregados*

Para avaliar a influência dos diferentes tipos de agregados utilizados nas argamassas, comparou-se, argamassas com tipos de curas iguais, mesmas dimensões das partículas dos agregados e mesmo tipo de pré-molhagem ou secagem dos agregados. Desta maneira, pode-se concluir se o tipo de agregado tinha influência significativa nas amostras ensaiadas.

Na Tabela 36 do anexo, apresentou-se os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nos desvios de cada amostra, em relação ao tipo de agregado utilizado. Sendo que, apenas duas amostras apresentaram desigualdade nos desvios, ambas na cura autógena e com a pré-molhagem dos agregados.

Em relação as médias das amostras pelo método da ANOVA, das 12 amostras apresentadas na tabela, 9 delas diferem significativamente umas das outras em relação ao tipo de agregado utilizado. Isto, pode ser visualizado na Tabela 20.

Tabela 20: Comparação das médias (ANOVA) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	MQR	MQG	F		$F_{\alpha(K-1;N-K)}$	DIFERENÇA
2,4 M 47% HR	10,19	190,84	18,73	>	3,68	EDSM
2,4 M AUT	16,38	30,42	1,86	<	3,74	NDSM
2,4 S 47% HR	3,37	19,07	5,66	>	3,68	EDSM
2,4 S AUT	1,79	115,65	64,44	>	3,74	EDSM
1,2 M 47% HR	10,41	103,66	9,95	>	3,81	EDSM
1,2 M AUT	2,68	35,64	13,32	>	3,74	EDSM
1,2 S 47% HR	2,94	27,45	9,33	>	3,81	EDSM
1,2 S AUT	2,04	49,72	24,34	>	3,74	EDSM
0,6 M 47% HR	3,53	75,74	21,43	>	3,68	EDSM
0,6 M AUT	4,72	61,19	12,97	>	3,68	EDSM
0,6 S 47% HR	3,09	8,21	2,65	<	3,68	NDSM
0,6 S AUT	5,71	13,24	2,32	<	3,68	NDSM

EDSM – Existe diferença significativa entre as médias;

NDSM – Não existe diferença significativa entre as médias.

Devido a diferença significativa encontrada nas médias através do método da ANOVA, realizou-se uma avaliação pelo método de DUNCAN, para obter valores mais confiáveis das médias, os mesmos estão apresentados na Tabela 37 do anexo. Com este método, pôde-se confirmar os resultados obtidos anteriormente, e ainda, constatar qual agregado diferenciava significativamente as amostras.

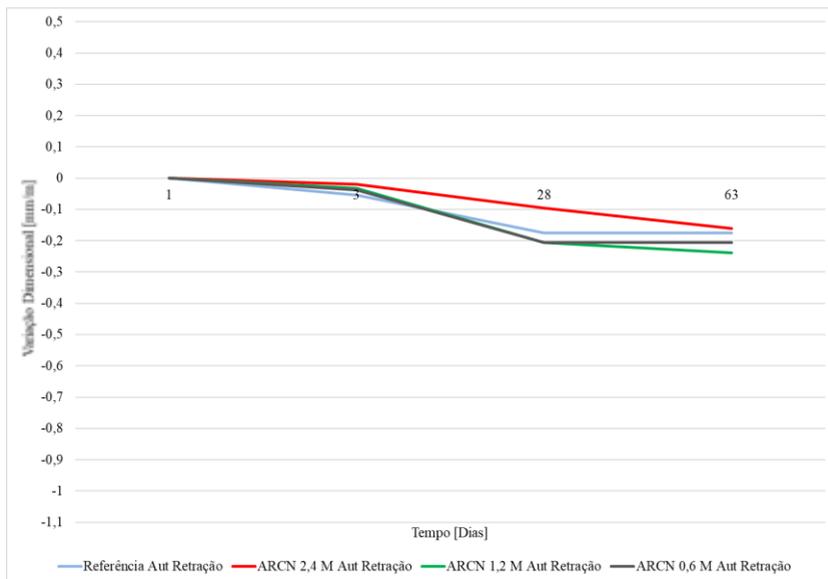
Apenas em três situações os agregados não diferenciaram significativamente suas médias: 2,4 M AUT, 0,6 S 47% HR e 0,6 S AUT. Nas outras situações sempre houve diferença significativa em pelo menos dois agregados, sendo que, o agregado que mais obteve diferença significativa entre as médias é o ARCE e o que resultou em menos variação foi o ARCN.

4.3.3 Retração

Os valores de variação dimensional das argamassas serão apresentados nas figuras a seguir, assim como, a variação da massa que cada mistura obteve em suas respectivas idades, sendo separadas conforme tipos de agregados e suas dimensões, tipos de cura e pré-molhagem ou secagem dos agregados. A variação da massa foi apresentada apenas para as amostras onde com a cura à 47% HR, isto porque, a cura autógena não tem troca de umidade com o meio externo, subentendendo-se que, a mesma, não perde massa durante o período de cura. Através da variação da massa das misturas com cura à 47% HR, pôde-se explicar uma possível causa para os efeitos observados na deformação linear das amostras tanto na retração quanto na expansão.

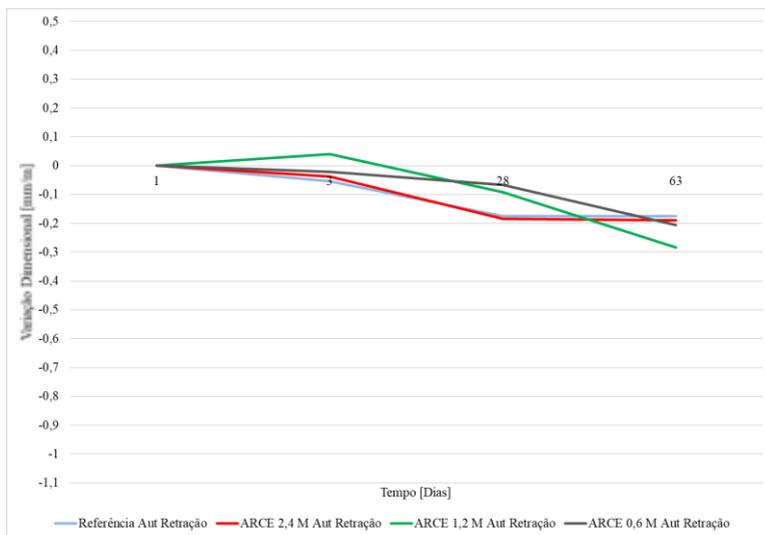
O gráfico da Figura 27 apresenta a variação dimensional das argamassas de referência e ARCN na condição de cura autógena e com agregados pré-molhados. Pode-se observar que as argamassas retraem ao longo do tempo, devido principalmente a perda e/ou transporte de água do material. A mistura que resultou em uma menor retração da argamassa foi a ARCN 2,4 M Aut, retraindo cerca de 9,09% a menos que a argamassa referência. As outras misturas resultaram em uma retração de até 35,22% maior em relação a argamassa referência.

Figura 27: Gráfico da retração da argamassa ARC� de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados pré-molhados



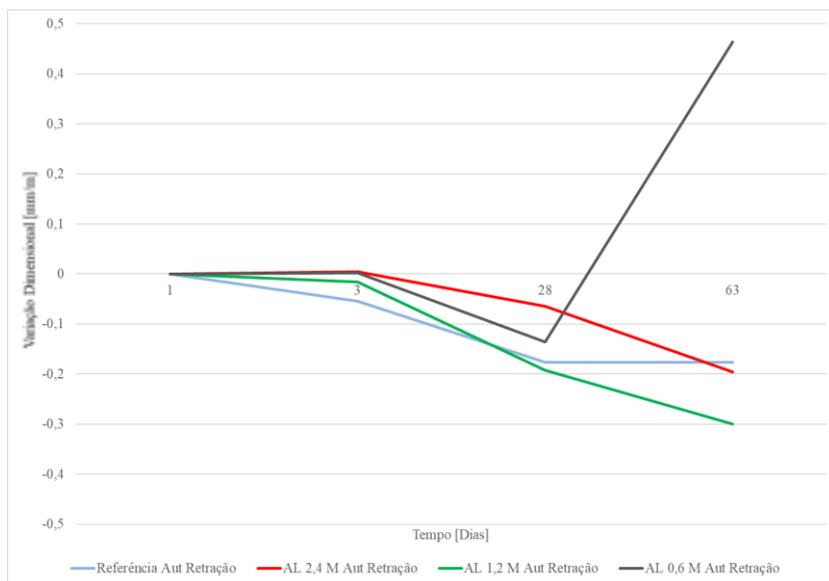
Na Figura 28, pode-se observar que a mistura ARCE resultou em um comportamento semelhante comparada a mistura de ARC�, ambas na cura autógena e pré-molhagem dos agregados, onde houve um aumento da retração. Aos 28 dias, as argamassas de ARCE 1,2 M Aut e ARCE M 0,6 Aut retraíram menos que a argamassa referência, porém, aos 63 dias, ambas resultaram em uma maior retração, sendo que a mistura ARCE 1,2 M Aut retraiu até 61,36% a mais. Já a mistura ARCE 2,4 M Aut obteve praticamente a mesma retração que a argamassa referência, tendo um aumento de apenas 7,95% aos 63 dias.

Figura 28: Gráfico da retração da argamassa ARCE de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados pré-molhados



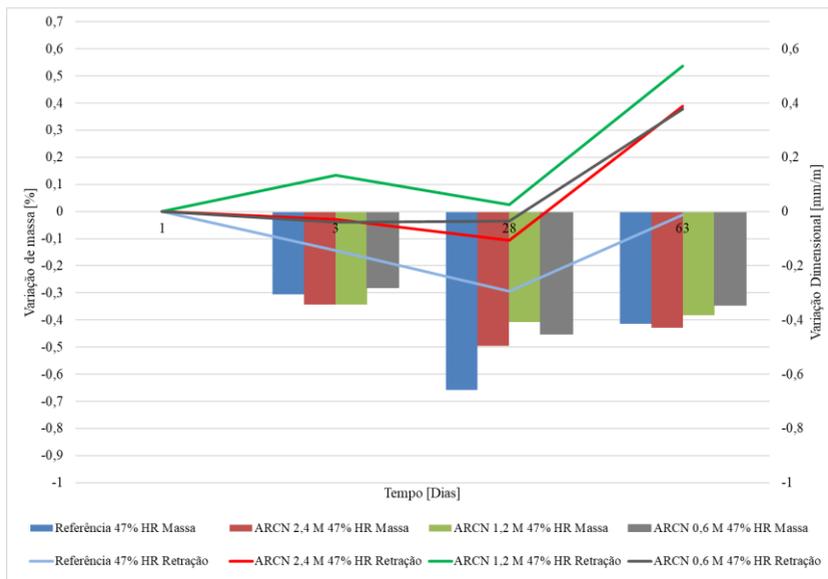
Na Figura 29 verificou-se também um aumento da retração ao longo do tempo, porém maiores do que os agregados reciclados vistos anteriormente, onde aos 28 dias resultou em uma retração próxima as que as argamassas com agregados reciclados obtiveram aos 63 dias. A mistura AL 2,4 M Aut resultou em uma retração próxima a argamassa referência aos 63 dias, já a mistura de AL 1,2 M Aut retraiu cerca de 70% a mais. No entanto, a mistura AL 0,6 M Aut obteve uma expansão elevada aos 63 dias.

Figura 29: Gráfico da retração da argamassa AL de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados pré-molhados



O gráfico da Figura 30 apresenta a variação da massa e a variação dimensional das argamassas de referência e ARCEN na condição de cura à 47% HR e com agregados pré-molhados, que são representadas respectivamente pelas colunas e pelas linhas. Neste caso as argamassas resultaram em uma perda de massa até os 28 dias e após esse período até os 63 dias de idade observou-se um ganho de massa. Este ganho de massa pode estar ligado ao tipo de cura utilizada, onde a mesma tinha uma variação entre 47% e 55% HR, podendo assim, gerar uma pequena absorção de água nas argamassas, e conseqüentemente, aumentar sua massa. Já a perda de massa que a argamassa sofreu pode estar diretamente ligada a perda de água, resultando em retração. As misturas com ARCEN tem uma menor retração aos 28 dias em relação a argamassa referência e uma expansão muito maior aos 63 dias.

Figura 30: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa referência em comparação as misturas ARCN de diferentes dimensões de partículas, cura à 47% de HR e agregados pré-molhados



A Figura 31 apresenta a variação da massa das argamassas com ARCE e referência e sua variação dimensional. Estas, tiveram o mesmo comportamento citado no gráfico anterior, onde houve inicialmente a retração das amostras e após os 28 dias a expansão das mesmas. Porém, se comparadas as misturas anteriores, a retração e expansão resultantes foi de até 60% a mais.

Em relação ao agregado leve, a Figura 32 apresenta a variação da massa nas diferentes idades, as quais, também resultaram no mesmo comportamento do gráfico anterior. Sendo que, há uma expansão nas dimensões de 2,4mm e 1,2mm aos 28 dias.

Figura 31: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa referência em comparação as misturas ARCE de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% de HR e agregados pré-molhados

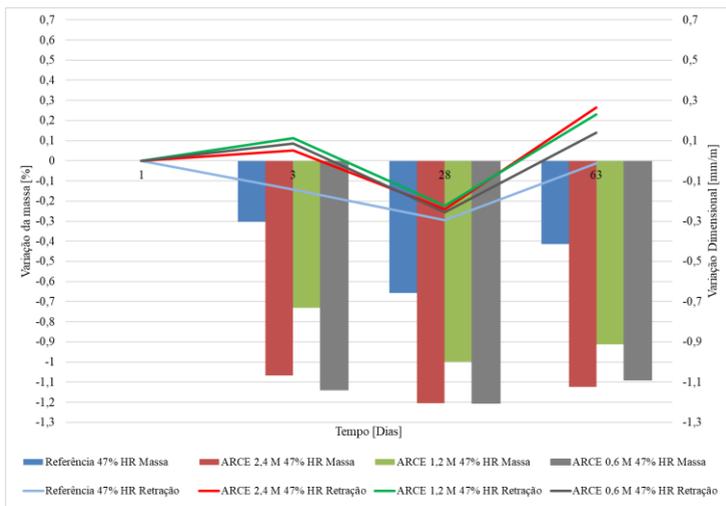
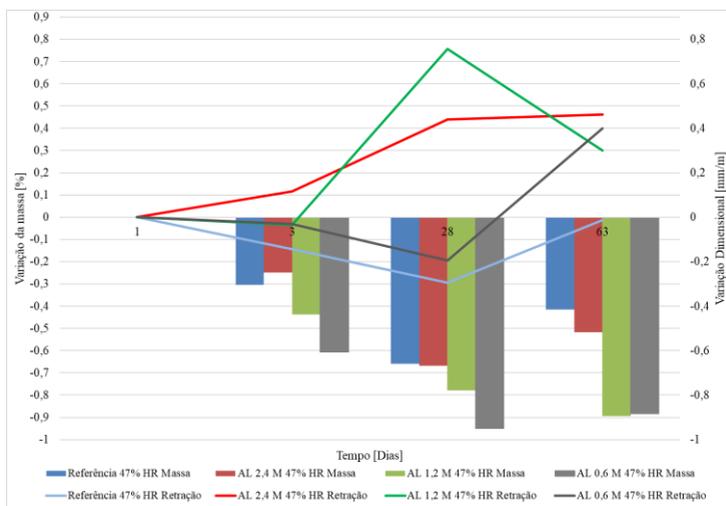


Figura 32: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa referência em comparação as misturas AL de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% de HR e agregados pré-molhados



A Tabela 21 apresenta um quadro-resumo com a variação dimensional máxima de todas as misturas com agregados pré-molhados.

Tabela 21: Quadro-resumo com a variação dimensional máxima de todas as misturas com agregados pré-molhados

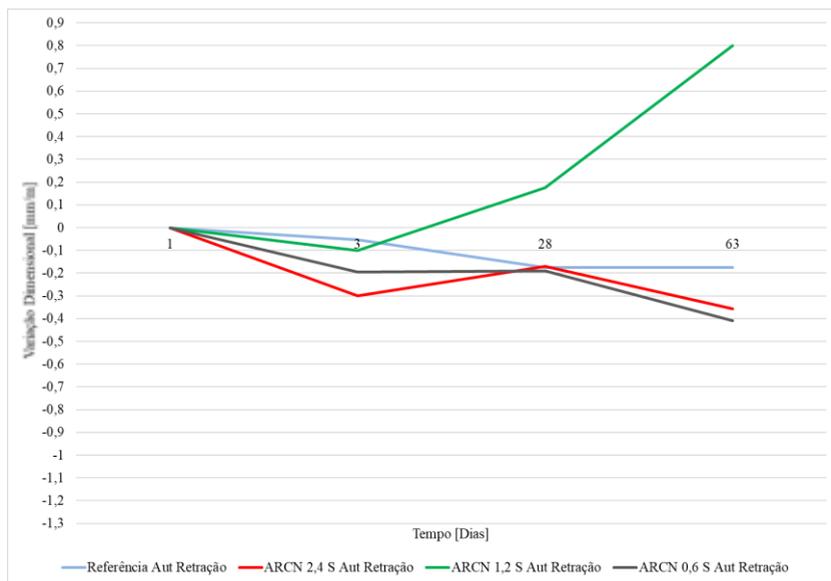
Misturas	Variação Dimensional Máxima – ϵ_i			
	Idade (dias)			
	1	3	28	63
Referência Aut	0	-0,05	-0,18	-0,18
ARCN 2,4 M Aut	0	-0,02	-0,09	-0,16
ARCN 1,2 M Aut	0	-0,03	-0,21	-0,24
ARCN 0,6 M Aut	0	-0,04	-0,21	-0,21
ARCE 2,4 M Aut	0	-0,04	-0,18	-0,19
ARCE 1,2 M Aut	0	0,04	-0,09	-0,28
ARCE 0,6 M Aut	0	-0,02	-0,07	-0,21
AL 2,4 M Aut	0	0,01	-0,06	-0,19
AL 1,2 M Aut	0	-0,02	-0,19	-0,30
AL 0,6 M Aut	0	0,01	-0,14	0,46
Referência 47% HR	0	-0,14	-0,29	-0,01
ARCN 2,4 M 47% HR	0	-0,03	-0,11	0,39
ARCN 1,2 M 47% HR	0	0,13	0,03	0,54
ARCN 0,6 M 47% HR	0	-0,04	-0,03	0,38
ARCE 2,4 M 47% HR	0	0,05	-0,24	0,27
ARCE 1,2 M 47% HR	0	0,11	-0,22	0,23
ARCE 0,6 M 47% HR	0	0,09	-0,26	0,14
AL 2,4 M 47% HR	0	0,12	0,44	0,46
AL 1,2 M 47% HR	0	-0,03	0,76	0,30
AL 0,6 M 47% HR	0	-0,03	-0,19	0,40

Até este momento, foram analisadas e avaliadas a retração e expansão das argamassas com diferentes dimensões das partículas, diferentes agregados, tipos de curas e com a condição de pré-molhagem dos agregados reciclados e leves. A partir de agora, serão apresentados os

resultados e análises dos agregados na condição seca com os mesmos parâmetros utilizados anteriormente.

A argamassa referência, como pode ser visualizada na Figura 33, retraiu ao longo do tempo, já nas misturas com ARCN houve uma expansão aos 28 dias, a qual voltou a retrair nas próximas idades. Apenas a mistura de ARCN 1,2 S Aut continuou expandindo até os 63 dias.

Figura 33: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa ARCN de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados secos



A Figura 34 apresenta a variação dimensional das argamassas referência e com ARCE, as quais, não apresentaram um comportamento esperado, sendo que todas expandiram até os 63 dias. Já na Figura 35 pôde-se avaliar a variação linear que as amostras AL resultaram, onde as misturas AL 2,4 S Aut e AL 1,2 S Aut, retraíram até 64% a menos que a argamassa referência e a mistura AL 0,6 S Aut resultou em uma elevada expansão aos 28 dias.

Figura 34: Gráfico da variação da massa e retração da ARCE de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados secos

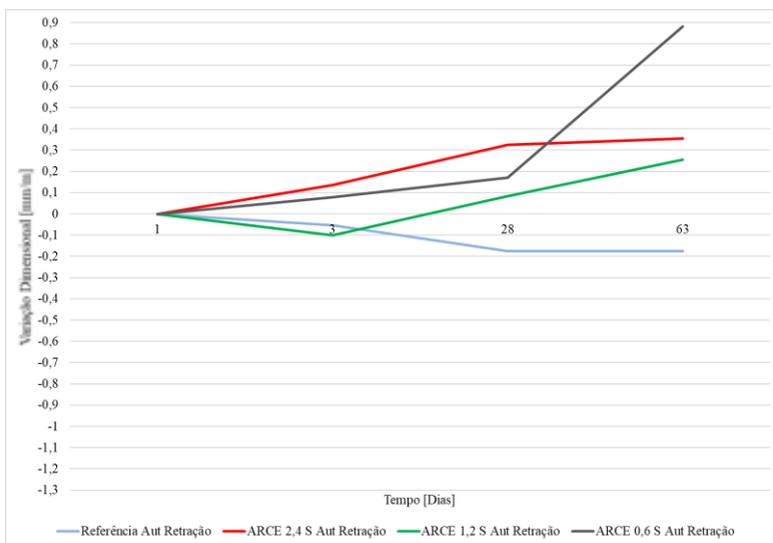
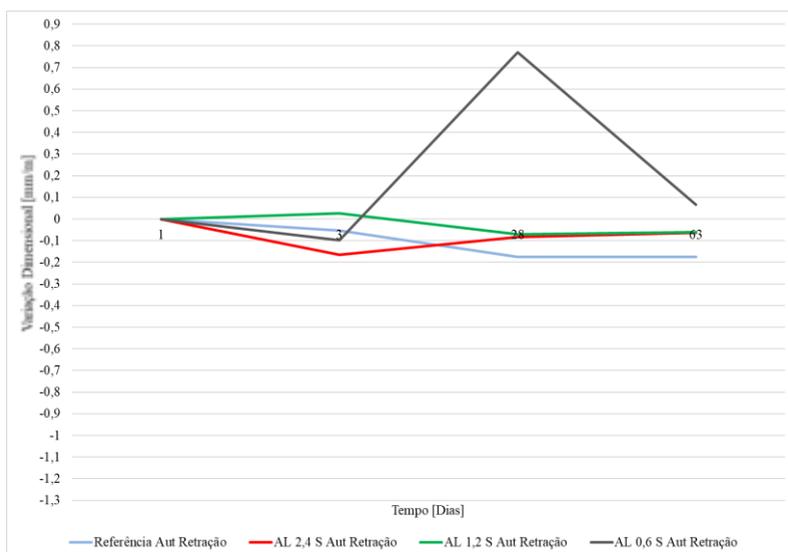


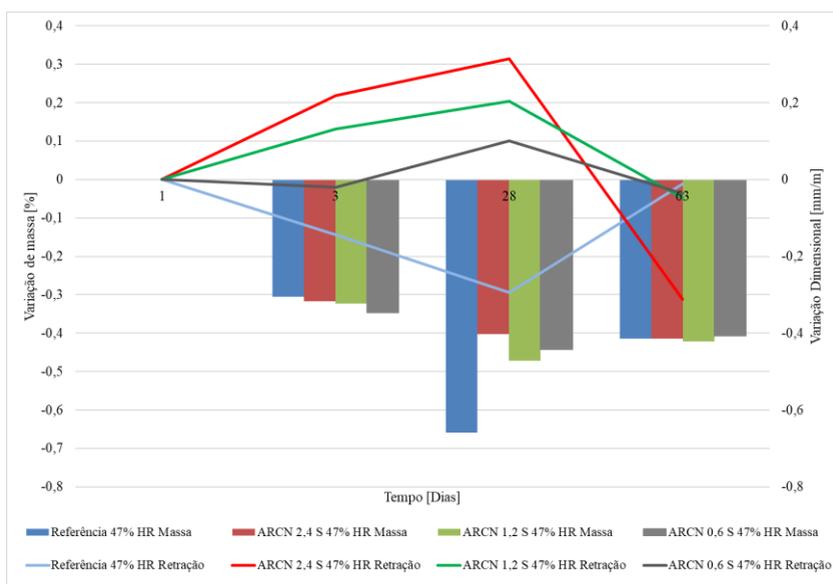
Figura 35: Gráfico da variação da massa e retração da AL de diferentes dimensões das partículas, cura autógena e agregados secos



No gráfico da Figura 36 a variação da massa resultou em valores descontínuos, onde, até a idade de 28 dias apresenta uma perda de massa e após esse período há um ganho de massa, resultados esses que coincidem com a variação da massa das outras misturas que também foram curadas à 47% HR. Apenas a amostra ARCN 2,4 S 47% HR não teve o mesmo comportamento, resultando apenas em perda de massa.

Em relação a variação dimensional, pôde-se notar, um comportamento diferente das misturas ARCN com agregados secos e cura à 47% HR, em relação aos agregados pré-molhados, com as mesmas características. Ocorrendo uma expansão aos 28 dias e retração deste período em diante, não podendo associá-las ao ganho e/ou perda de massa.

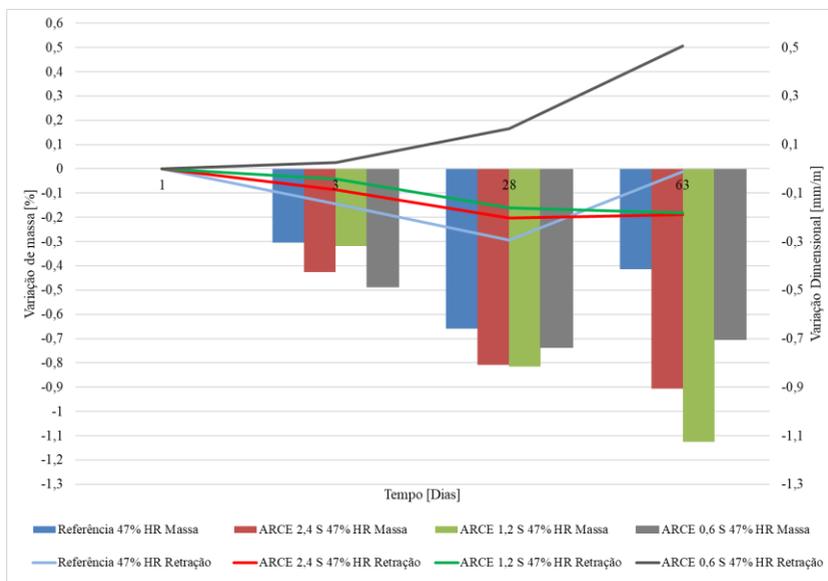
Figura 36: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa ARCN de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% HR e agregados secos



As misturas com dimensões da partícula de 2,4mm e 1,2mm no agregado ARCE obtiveram perda de massa conforme aumentava sua idade, resultando em uma pequena retração. Com a dimensão da partícula de 0,6mm houve uma perda de massa nas primeiras idades e depois um

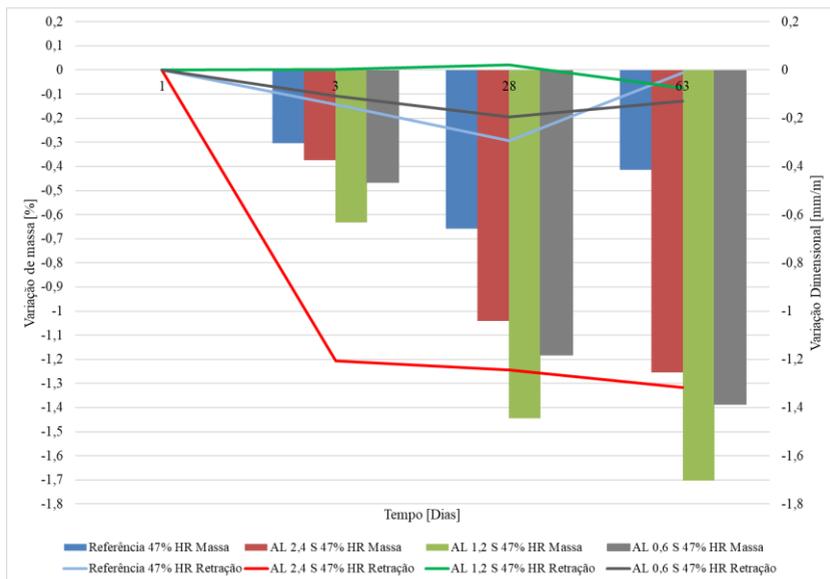
ganho de massa, resultando em uma expansão ao final dos 63 dias (Figura 37).

Figura 37: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa ARCE de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% HR e agregados secos



As argamassas com agregado leve e secos, com cura à 47% HR, resultaram em perda de massa conforme aumentava sua idade. Em relação a variação linear, as misturas AL 2,4 S 47% HR e AL 1,2 S 47% HR, mesmo com perda de massa, na idade de 28 dias, resultaram em uma expansão do material, voltando então a retrair após esse período. A mistura AL 0,6 S 47% HR expandiu aos 63 dias, mesmo tendo uma quantidade de perda de água considerável (Figura 38).

Figura 38: Gráfico da variação da massa e retração da argamassa referência em comparação as misturas AL de diferentes dimensões das partículas, cura à 47% HR e agregados secos



A Tabela 22 apresenta um quadro-resumo com a variação dimensional máxima de todas as misturas com agregados secos.

Tabela 22: Quadro-resumo com a variação dimensional máxima de todas as misturas com agregados secos

Misturas	Variação dimensional Máxima – ϵ_i			
	Idade (dias)			
	1	3	28	63
Referência Aut	0	-0,05	-0,18	-0,18
ARCN 2,4 S Aut	0	-0,30	-0,17	-0,36
ARCN 1,2 S Aut	0	-0,10	0,18	0,80
ARCN 0,6 S Aut	0	-0,19	-0,19	-0,41
ARCE 2,4 S Aut	0	0,14	0,32	0,35
ARCE 1,2 S Aut	0	-0,10	0,08	0,26
ARCE 0,6 S Aut	0	0,08	0,17	0,88
AL 2,4 S Aut	0	-0,17	-0,08	-0,06
AL 1,2 S Aut	0	0,03	-0,07	-0,06
AL 0,6 S Aut	0	-0,09	0,77	0,07
Referência 47% HR	0	-0,14	-0,29	-0,01
ARCN 2,4 S 47% HR	0	0,22	0,31	-0,31
ARCN 1,2 S 47% HR	0	0,13	0,20	-0,05
ARCN 0,6 S 47% HR	0	-0,02	0,10	-0,04
ARCE 2,4 S 47% HR	0	-0,09	-0,20	-0,19
ARCE 1,2 S 47% HR	0	-0,04	-0,16	-0,18
ARCE 0,6 S 47% HR	0	0,03	0,17	0,51
AL 2,4 S 47% HR	0	-1,21	-1,24	-1,32
AL 1,2 S 47% HR	0	0,01	0,02	-0,08
AL 0,6 S 47% HR	0	-0,11	-0,19	-0,13

Assim como era esperado, as argamassas que passaram pelo processo de cura à 47% HR resultaram em uma variação dimensional descontínua, ou seja, uma mesma amostra retraiu e expandiu dependendo a idade em que fosse avaliada. Isso ocorreu principalmente devido ao ganho e/ou perda de massa que a argamassa sofria ao longo do tempo. Já a cura autógena por ser uma cura sem troca de umidade com o meio externo, resultou em valores com menores variações tendo ao longo do tempo, em praticamente todas as amostras, apenas retraído.

Menezes et al. (2006) realizaram uma revisão da literatura apontando os aspectos fundamentais da expansão por umidade em materiais cerâmicos. Estes materiais quando em contato com a água em sua forma líquida ou gasosa podem sofrer expansão. A expansão ocorre devido ao processo de adsorção de líquidos, que reduz a energia superficial do sólido e a compressão interna, com a redução desta tensão

o sólido se comporta elasticamente e expande. Desta forma, se a partícula de água for fortemente atraída para a superfície do material que por outras partículas de água, ela será adsorvida pela superfície e resultará em expansão.

Este fenômeno de ganho de massa ao longo do tempo na cura à 47% HR, também pode ter ocorrido, devido a essas argamassas serem curadas em uma única caixa, onde amostras com idades de 28 dias, se misturavam a amostras de um dia, onde estas, se encontravam no período inicial de hidratação e conseqüentemente, liberavam uma quantidade maior de umidade resultando em umidade relativa mais elevada. Estas umidades eram controladas assim que as amostras fossem inseridas na caixa, mas não pode ser excluída a possibilidade de um aumento da umidade relativa do recipiente nestes primeiros dias.

4.3.4 Análise Estatística ANOVA – Retração

Para uma melhor avaliação dos resultados encontrados no ensaio de variação dimensional das argamassas, foi realizada uma análise estatística através do método da ANOVA. Para isso, foram analisadas quatro diferentes variáveis do estudo, sendo elas, a dimensão da partícula, o tipo de cura, o tipo de agregado e a condição de molhagem dos agregados. Desta maneira, pode-se constatar, quais dessas variáveis tinham influência significativa nos resultados da retração.

Na Tabela 23 estão as médias, desvio padrão e número de amostras, que foram utilizadas para o cálculo da ANOVA.

Tabela 23: Dados utilizados para cálculo da ANOVA no ensaio de retração

AMOSTRA	N	MÉDIA	DESVIO P.
ARCN 2,4 M 47% HR	3	0,39	0,31
ARCN 2,4 M AUT	2	-0,16	0,02
ARCN 2,4 S 47% HR	2	-0,31	0,45
ARCN 2,4 S AUT	2	-0,36	0,13
ARCN 1,2 M 47% HR	3	0,54	0,18
ARCN 1,2 M AUT	2	-0,24	0,02
ARCN 1,2 S 47% HR	2	-0,05	0,06
ARCN 1,2 S AUT	2	0,80	0,50
ARCN 0,6 M 47% HR	3	0,38	0,17
ARCN 0,6 M AUT	2	-0,21	0,01
ARCN 0,6 S 47% HR	2	-0,04	0,01
ARCN 0,6 S AUT	2	-0,41	0,03
ARCE 2,4 M 47% HR	3	0,27	0,05
ARCE 2,4 M AUT	3	-0,19	0,09
ARCE 2,4 S 47% HR	3	-0,19	0,18
ARCE 2,4 S AUT	2	0,35	0,31
ARCE 1,2 M 47% HR	2	0,23	0,05
ARCE 1,2 M AUT	2	-0,24	0,06
ARCE 1,2 S 47% HR	2	-0,18	0,33
ARCE 1,2 S AUT	2	0,26	0,13
ARCE 0,6 M 47% HR	3	0,14	0,12
ARCE 0,6 M AUT	2	-0,21	0,04
ARCE 0,6 S 47% HR	3	0,51	0,49
ARCE 0,6 S AUT	2	0,88	0,04
AL 2,4 M 47% HR	3	0,46	0,03
AL 2,4 M AUT	2	-0,19	0,01
AL 2,4 S 47% HR	3	-1,32	0,69
AL 2,4 S AUT	2	-0,06	0,03
AL 1,2 M 47% HR	3	0,30	0,06

AL 1,2 M AUT	2	-0,30	0,01
AL 1,2 S 47% HR	2	-0,08	0,06
AL 1,2 S AUT	2	-0,06	0,03
AL 0,6 M 47% HR	2	0,40	0,03
AL 0,6 M AUT	2	0,46	0,45
AL 0,6 S 47% HR	2	-0,13	0,03
AL 0,6 S AUT	3	0,07	0,26

Nos próximos itens, serão apresentados os valores encontrados para cada variável no cálculo da ANOVA e se os mesmos, influenciam significativamente a variação dimensional das argamassas.

4.3.4.1 *Tipos de Curas*

Para que fosse possível avaliar a influência das curas autógena e à 47% de HR nas argamassas, comparou-se, argamassas com substituição das dimensões das partículas iguais, mesmas condições de saturação dos agregados e mesmo tipo de agregado utilizado. Desta maneira, pode-se concluir se a cura tinha influência significativa nas amostras ensaiadas.

Na Tabela 38 do anexo apresentou-se os resultados encontrados para avaliar a igualdade dos desvios de cada amostra, em relação ao tipo de cura. E como pode ser observado, todas as amostras resultaram em HID (aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios).

Na Tabela 24 realizou-se a comparação das médias através do método da ANOVA. O que pode-se concluir, é que o tipo de cura teve maior influência quando utilizado a pré-molhagem dos agregados reciclados e leves, sendo que apenas duas amostras sem a pré-molhagem dos agregados, resultou em uma diferença significativa das médias, igual aos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão.

Tabela 24: Comparação das médias (ANOVA) para os diferentes tipos de cura no ensaio de retração

AMOSTRAS	MQR	MQG	F		$F_{\alpha(K-1;N-K)}$	DIFERENÇA
ARCN 2,4 M	0,06	0,36	5,69	<	10,13	NDSM
ARCN 2,4 S	0,11	0,00	0,02	<	18,51	NDSM
ARCN 1,2 M	0,02	0,72	32,34	>	10,13	EDSM
ARCN 1,2 S	0,13	0,72	5,62	<	18,51	NDSM
ARCN 0,6 M	0,02	0,41	22,19	>	10,13	EDSM
ARCN 0,6 S	0,00	0,14	216,73	>	18,51	EDSM
ARCE 2,4 M	0,01	0,31	61,76	>	7,71	EDSM
ARCE 2,4 S	0,05	0,35	6,59	<	10,13	NDSM
ARCE 1,2 M	0,00	0,22	71,86	>	18,51	EDSM
ARCE 1,2 S	0,06	0,19	3,13	<	18,51	NDSM
ARCE 0,6 M	0,01	0,14	15,27	>	10,13	EDSM
ARCE 0,6 S	0,17	0,17	1,03	<	10,13	NDSM
AL 2,4 M	0,00	0,52	877,34	>	10,13	EDSM
AL 2,4 S	0,32	1,88	5,87	<	10,13	NDSM
AL 1,2 M	0,00	0,43	163,08	>	10,13	EDSM
AL 1,2 S	0,00	0,00	0,08	<	18,53	NDSM
AL 0,6 M	0,10	0,00	0,04	<	18,53	NDSM
AL 0,6 S	0,05	0,05	0,99	<	10,13	NDSM

EDMS – Existe diferença significativa entre as médias;

NDSM – Não existe diferença significativa entre as médias.

Ainda, para que fosse possível obter um cálculo mais confiante das médias, realizou-se a avaliação pelo método DUNCAN, apresentado na Tabela 39 do anexo. Com este método, pode-se confirmar os resultados obtidos anteriormente, onde, os agregados com a pré-molhagem apresentaram maior influência dos tipos de cura, em relação aos agregados secos.

Conclui-se assim, que em relação ao tipo de cura do agregado, em ambos os ensaios realizados, de resistência à compressão e retração, a estatística resultou em um mesmo comportamento.

4.3.4.2 Dimensões das partículas

Para avaliar a influência das diferentes dimensões das partículas utilizada nas argamassas, comparou-se, argamassas com tipos de curas

iguais, mesmas condições de saturação dos agregados e mesmo tipo de agregado utilizado. Desta maneira, pode-se concluir se as diferentes dimensões das partículas tinham influência significativa nas amostras ensaiadas.

Na Tabela 40 do anexo, apresentou-se os resultados encontrados para avaliar a igualdade dos desvios de cada amostra, em relação as diferentes dimensões das partículas. Sendo que, nenhuma das amostras apresentaram desigualdades nos desvios.

Em relação as médias das amostras pelo método da ANOVA, a maioria das amostras não resultou em diferença significativa das médias. Na Tabela 25 pode-se observar que, apenas três amostras que utilizaram a pré-molhagem dos agregados, resultaram em amostras com diferença significativa das médias.

Tabela 25: Comparação das médias (ANOVA) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de retração

AMOSTRAS	MQR	MQG	F		F_{α(K-1;N-K)}	DIFERENÇA
ARCN M 47% HR	0,05	0,02	0,47	<	5,14	NDSM
ARCN M AUT	0,00	0,00	15,71	>	9,55	EDSM
ARCN S 47% HR	0,07	0,05	0,72	<	9,55	NDSM
ARCN S AUT	0,09	0,93	10,31	>	9,55	EDSM
ARCE M 47% HR	0,01	0,01	1,81	<	5,79	NDSM
ARCE M AUT	0,01	0,00	0,29	<	6,94	NDSM
ARCE S 47% HR	0,13	0,45	3,36	<	5,79	NDSM
ARCE S AUT	0,04	0,23	5,98	<	9,55	NDSM
AL M 47% HR	0,00	0,02	9,33	>	5,79	EDSM
AL M AUT	0,07	0,34	5,15	<	9,55	NDSM
AL S 47% HR	0,24	1,26	5,24	<	6,94	NDSM
AL S AUT	0,03	0,01	0,42	<	6,94	NDSM

EDMS – Existe diferença significativa entre as médias;

NDSM – Não existe diferença significativa entre as médias.

Desta forma, ao realizar o método de DUNCAN, permitiu-se obter uma avaliação mais completa em relação as diferentes dimensões das partículas utilizadas no estudo. Estes resultados, estão apresentados na Tabela 41 do anexo.

Entre as misturas, as que resultaram em diferença significativa das médias, foram as amostras ARCN M AUT, ARCN S AUT e AL M 47% HR, confirmando o método de avaliação das médias da ANOVA. Nestas misturas, a dimensão da partícula que diferenciou em todos os casos, foi a de 1,2mm. Desta forma, não identificou-se diferenças significativas em relação as diferentes dimensões das partículas utilizadas no presente estudo.

4.3.4.3 *Pré-molhagem ou secagem dos agregados*

Para avaliar a influência da pré-molhagem ou secagem utilizada nos agregados, comparou-se, argamassas com tipos de curas iguais, mesmas dimensões das partículas dos agregados e mesmo tipo de agregado utilizado. Desta maneira, pode-se concluir se a pré-molhagem tinha influência significativa nas amostras ensaiadas.

Na Tabela 42 do anexo, apresentou-se os resultados encontrados para avaliar a igualdade dos desvios de cada amostra, em relação a pré-molhagem e secagem dos agregados. Sendo que, apenas uma amostra apresentou desigualdade nos desvios, a AL 2,4 47% HR.

Em relação as médias das amostras pelo método da ANOVA, das 18 amostras apresentadas na tabela, 11 delas diferem significativamente umas das outras em relação a pré-molhagem. Ou seja, mais da metade diferiu significativamente, concluindo que a pré-molhagem tem uma influência significativa nos resultados da retração, principalmente quando realizada a cura à 47% HR, como pode ser visualizado na Tabela 26.

Tabela 26: Comparação das médias (ANOVA) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de retração

AMOSTRAS	MQR	MQG	F		$F_{\alpha(k-1;N-k)}$	DIFERENÇA
ARCN 2,4 47% HR	0,15	0,49	3,33	<	18,51	NDSM
ARCN 2,4 AUT	0,01	0,05	3,96	<	10,13	NDSM
ARCN 1,2 47% HR	0,02	0,41	18,72	>	10,13	EDSM
ARCN 1,2 AUT	0,13	1,08	8,51	<	18,51	NDSM
ARCN 0,6 47% HR	0,02	0,20	11,12	>	10,13	EDSM
ARCN 0,6 AUT	0,00	0,04	70,05	>	18,51	EDSM
ARCE 2,4 47% HR	0,02	0,31	17,36	>	7,71	EDSM
ARCE 2,4 AUT	0,07	0,36	5,42	<	10,13	NDSM
ARCE 1,2 47% HR	0,05	0,17	3,15	<	18,51	NDSM
ARCE 1,2 AUT	0,01	0,25	23,72	>	18,51	EDSM
ARCE 0,6 47% HR	0,13	0,19	1,54	<	7,71	NDSM
ARCE 0,6 AUT	0,00	1,18	669,82	>	18,51	EDSM
AL 2,4 47% HR	0,24	4,75	19,74	>	7,71	EDSM
AL 2,4 AUT	0,00	0,02	39,42	>	18,51	EDSM
AL 1,2 47% HR	0,00	0,17	43,19	>	10,13	EDSM
AL 1,2 AUT	0,00	0,06	116,79	>	18,51	EDSM
AL 0,6 47% HR	0,00	0,28	241,16	>	18,51	EDSM
AL 0,6 AUT	0,13	0,16	1,18	<	18,51	NDSM

EDSM – Existe diferença significativa entre as médias;

NDSM – Não existe diferença significativa entre as médias.

Além disso, para que fosse possível obter uma estimativa mais confiável das médias, realizou-se a avaliação pelo método DUNCAN, os quais estão apresentados na Tabela 43 do anexo. Com este método, pôde-se confirmar os resultados obtidos anteriormente.

Através da análise estatística pôde-se comprovar que a argamassa com a pré molhagem dos agregados diferiu significativamente da argamassa com agregados secos na maioria dos casos.

4.3.4.4 Tipos de agregados

Para avaliar a influência dos diferentes tipos de agregados utilizados nas argamassas, comparou-se, argamassas com tipos de curas iguais, mesmas dimensões das partículas dos agregados e mesmo tipo pré-molhagem. Desta maneira, pode-se concluir se o tipo de agregado tinha influência significativa nas amostras ensaiadas.

Na Tabela 44 do anexo, apresentou-se os resultados encontrados para avaliar a igualdade dos desvios de cada amostra, em relação ao tipo de agregado utilizado. Sendo que, nenhuma amostra apresentou desigualdade nos desvios.

Em relação as médias das amostras pelo método da ANOVA, das 12 amostras apresentadas na tabela, apenas uma delas difere significativamente umas das outras em relação ao tipo de agregado utilizado, como pode ser visualizado na Tabela 27.

Tabela 27: Comparação das médias (ANOVA) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de retração

AMOSTRAS	MQR	MQG	F		$F_{\alpha(k-1;N-K)}$	DIFERENÇA
2,4 M 47% HR	0,03	0,03	0,91	<	5,14	NDSM
2,4 M AUT	0,00	0,00	0,21	<	6,94	NDSM
2,4 S 47% HR	0,25	1,09	4,48	<	5,79	NDSM
2,4 S AUT	0,04	0,26	6,78	<	9,55	NDSM
1,2 M 47% HR	0,01	0,07	4,76	<	5,79	NDSM
1,2 M AUT	0,00	0,00	1,79	<	9,55	NDSM
1,2 S 47% HR	0,04	0,01	0,27	<	9,55	NDSM
1,2 S AUT	0,09	0,38	4,21	<	9,55	NDSM
0,6 M 47% HR	0,02	0,06	3,54	<	5,79	NDSM
0,6 M AUT	0,07	0,29	4,45	<	9,55	NDSM
0,6 S 47% HR	0,12	0,29	2,42	<	6,94	NDSM
0,6 S AUT	0,03	0,86	24,59	>	6,94	EDSM

EDMS – Existe diferença significativa entre as médias;
NDSM – Não existe diferença significativa entre as médias.

O mesmo, pode ser avaliado quando realizado o método de DUNCAN, onde apenas a dimensão da partícula de 0,6mm e com o agregado AL apresentou diferença significativa das médias. Nas demais

amostras, nenhuma obteve diferença significativa das médias (Tabela 45, do anexo).

Conclui-se assim, que as variáveis que resultaram em maiores diferenças significativas das médias, foram quando aplicou-se os diferentes tipos de curas nas argamassas e quando aplicadas a pré-molhagem dos agregados utilizados. Isto pode ser verificado também, nos gráficos realizados para cada amostra de retração.

4.4 PROPRIEDADES DA MICROESTRUTURA DA ARGAMASSA

4.4.1 Adsorção

As isotermas de adsorção estão representadas nos gráficos a seguir. Cada figura apresenta argamassas de diferentes agregados e dimensões das partículas, dois tipos de cura e condições de saturação dos agregados na pré-molhagem e secagem.

A argamassa referência com cura autógena está representada pela Figura 39, logo em seguida a Figura 40 com as argamassas ARCN e suas diferentes dimensões das partículas, a Figura 41 com as argamassas ARCE e suas diferentes dimensões das partículas e por fim, na Figura 42 com as argamassas AL e suas diferentes dimensões das partículas. Todas na condição de cura autógena.

Figura 39: Gráfico da adsorção da mistura referência com cura autógena

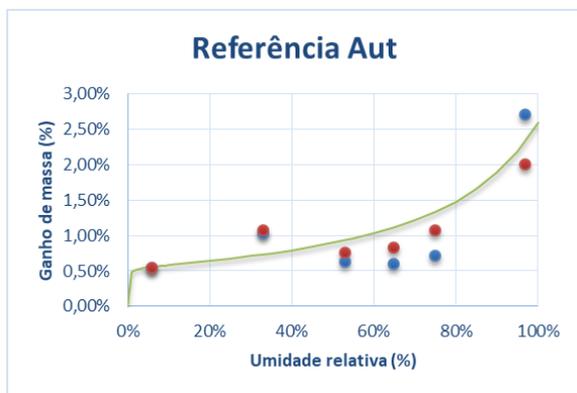
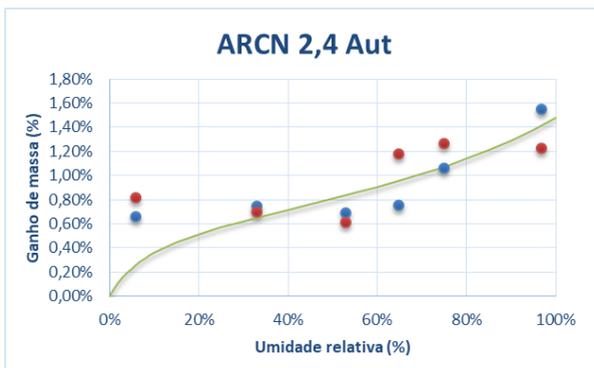
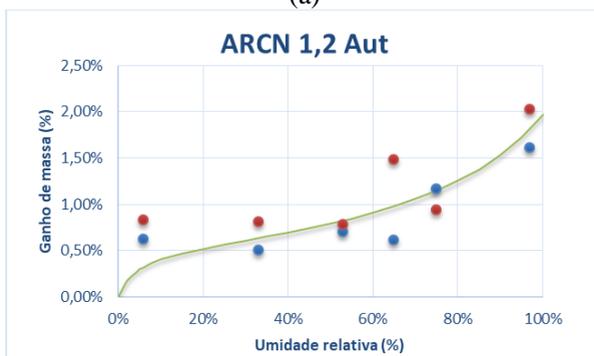


Figura 40: Gráfico da adsorção da mistura ARCn com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)



(b)

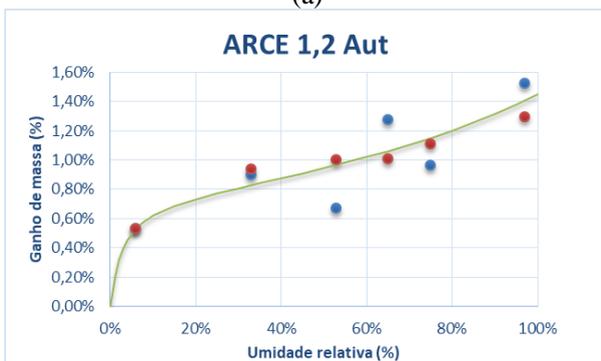


(c)

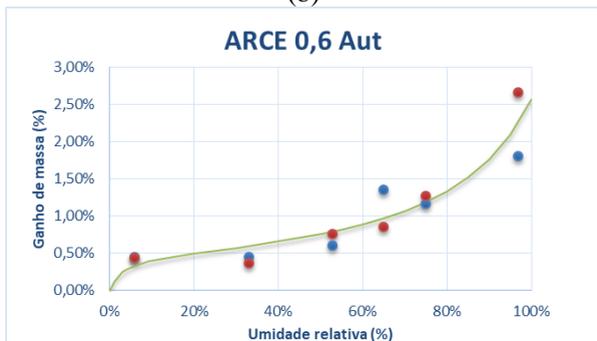
Figura 41: Gráfico da adsorção da mistura ARCE com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)

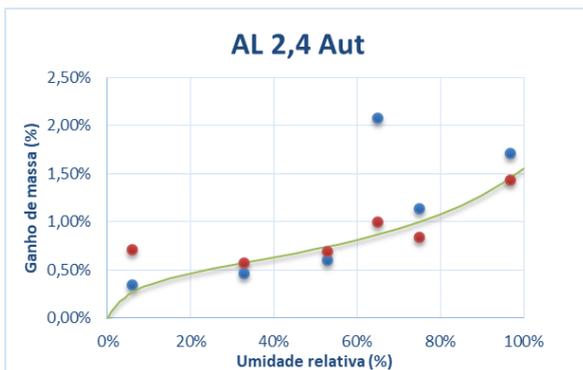


(b)



(c)

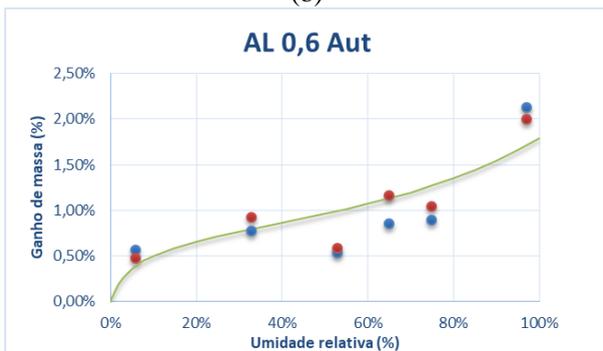
Figura 42: Gráfico da adsorção da mistura AL com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)



(b)



(c)

Os próximos gráficos apresentam a argamassa referência com cura a 47% HR representada pela Figura 43, logo em seguida a Figura 44 com a argamassa ARCN e suas diferentes dimensões das partículas, a Figura 45 com a argamassa ARCE e suas diferentes dimensões das partículas e por fim, na Figura 46 com a argamassa AL e suas diferentes dimensões das partículas. Todas nas condições de cura a 47% HR.

Figura 43: Gráfico da adsorção da mistura Referência com cura a 47% HR

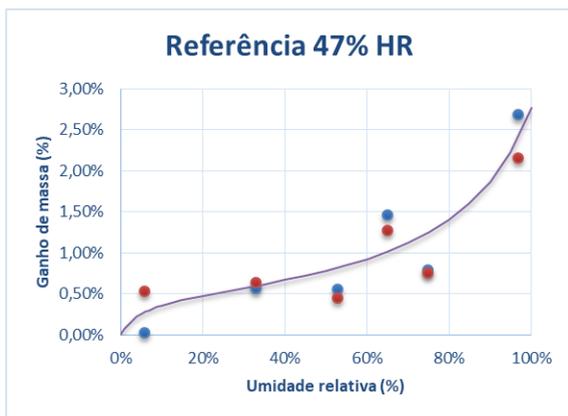
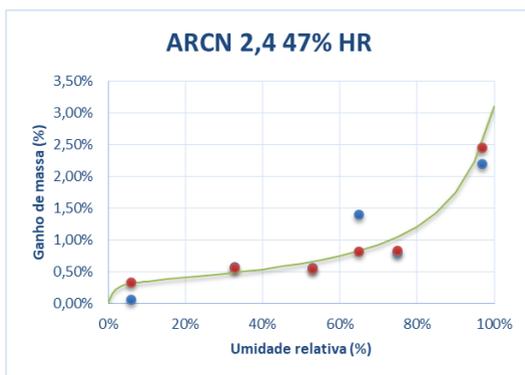
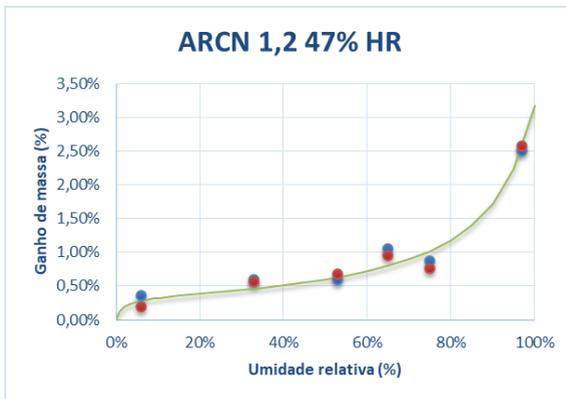


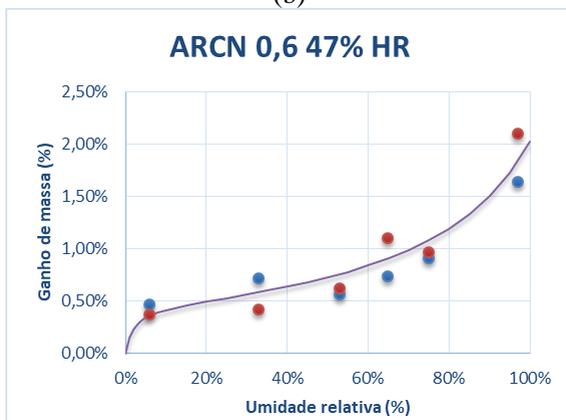
Figura 44: Gráfico da adsorção da mistura ARCN com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura a 47% HR, (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 45: Gráfico da adsorção da mistura ARCE com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura a 47% HR. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)



(b)



(c)

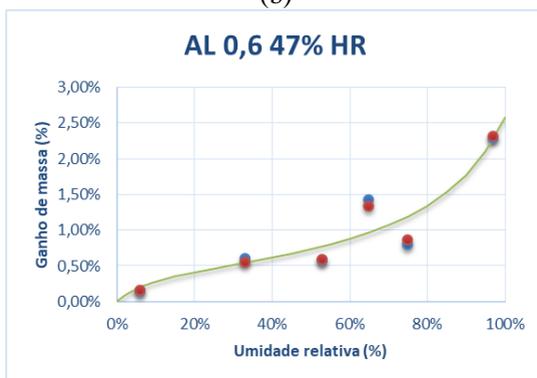
Figura 46: Gráfico da adsorção da mistura AL com as diferentes dimensões das partículas na pré-molhagem e com cura a 47% HR. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)



(b)



(c)

Todas as misturas independente do tipo de cura resultaram em um comportamento de curva parecido, sendo classificadas como isotermas de adsorção tipo II. Esta classificação define a argamassa como não porosa ou macroporosa, apresentando uma grande interação entre gás e sólido conforme descrito pela IUPAC (1982).

Em relação ao tipo de cura, as argamassas com cura a 47% HR resultaram em uma maior variação do conteúdo de umidade se comparada com a cura autógena. Isso pode ser explicado por essas argamassas de cura autógena ter uma cura com maior umidade relativa, podendo resultar em uma maior hidratação das partículas.

Através do ensaio de adsorção, foi possível calcular a área superficial de cada mistura, com cada tipo de cura, apresentada na Figura 47 e Figura 48.

Figura 47: Gráfico da área superficial das amostras com cura autógena e pré-molhagem dos agregados

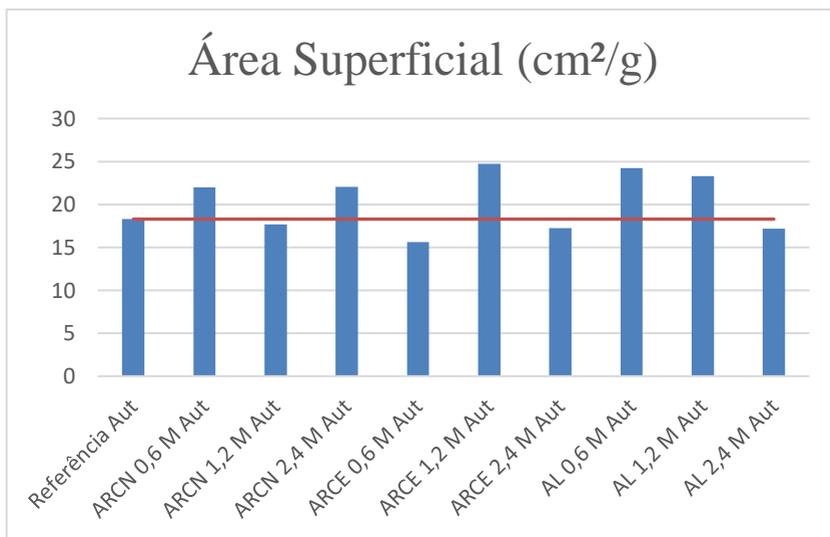
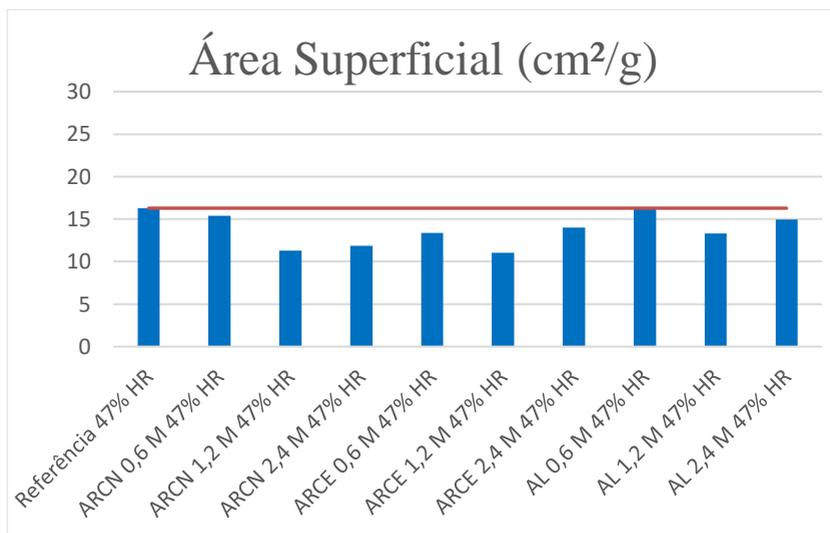


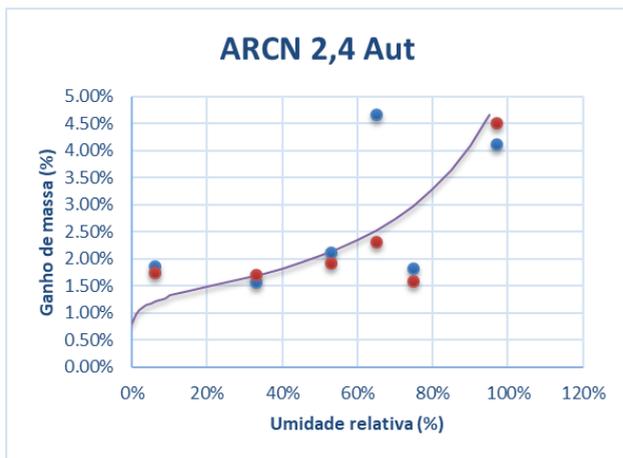
Figura 48: Gráfico da área superficial das amostras com cura a 47% HR e pré-molhagem dos agregados



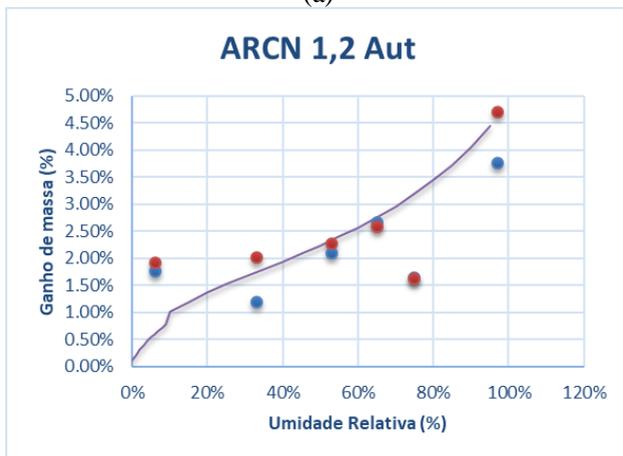
Em relação a área superficial, as argamassas que foram mantidas a cura autógena resultaram em uma estrutura porosa de maior área superficial se comparadas as que foram mantidas a cura a 47% HR. Na argamassa de referência a diferença entre os tipos de cura foi de 10,94%, já em algumas amostras o valor chegou a dobrar quando utilizada a cura autógena, ou seja, tendo um aumento de 100%. Conforme Baroghel-Bouni (1994) *apud* Salomão (2016), estes resultados podem ser explicados devido ao refinamento da rede de poros resultante da cura autógena.

Este ensaio também foi realizado para as misturas na condição seca do agregado mantidas em duas condições de cura: autógena e a 47% HR. Na Figura 49, Figura 50 e Figura 51, são apresentados os gráficos com a variação do conteúdo de umidade que cada mistura obteve na umidade relativa que foram inseridas.

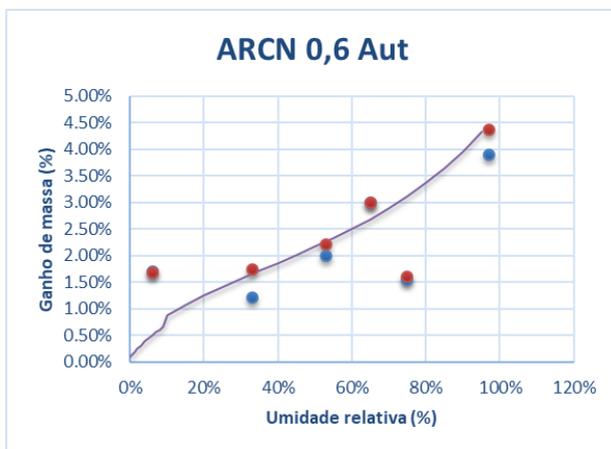
Figura 49: Gráfico da adsorção da mistura ARCn com as diferentes dimensões das partículas secas e na cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)



(b)

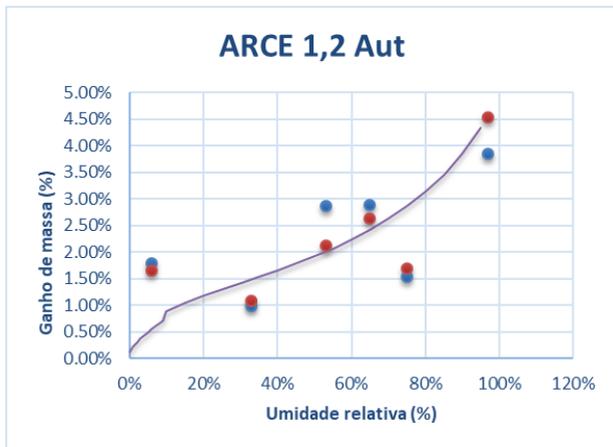


(c)

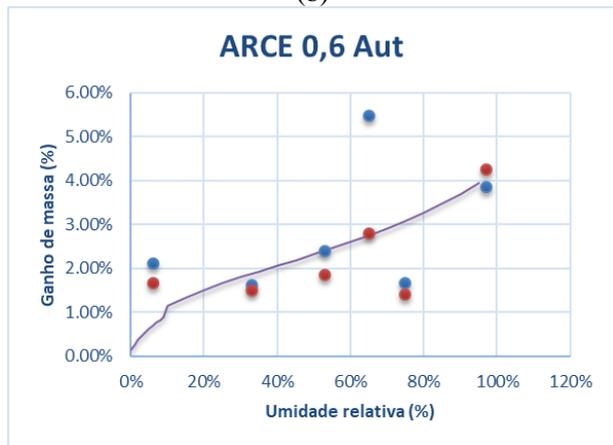
Figura 50: Gráfico da adsorção da mistura ARCE com as diferentes dimensões das partículas secas e na cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)

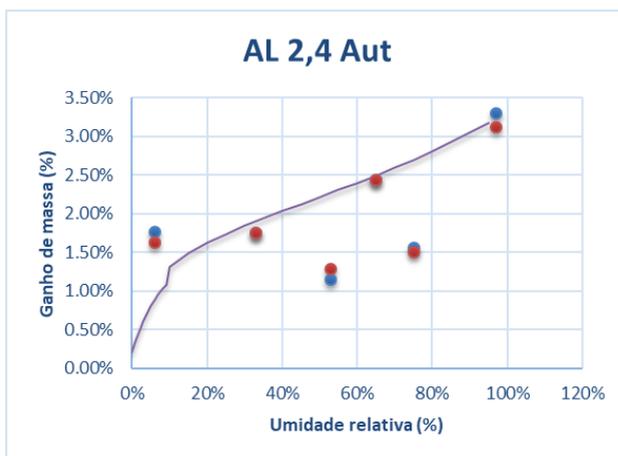


(b)

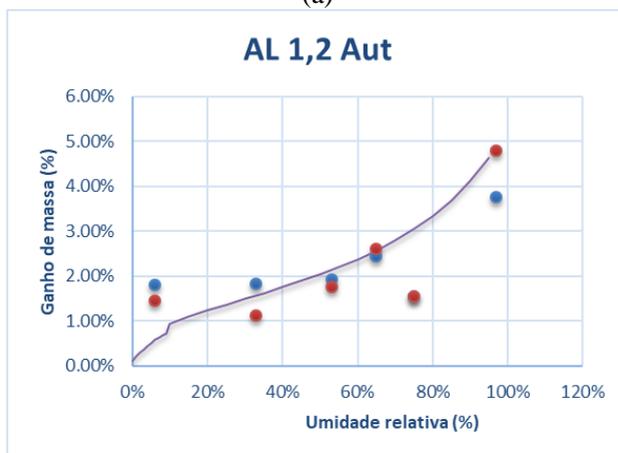


(c)

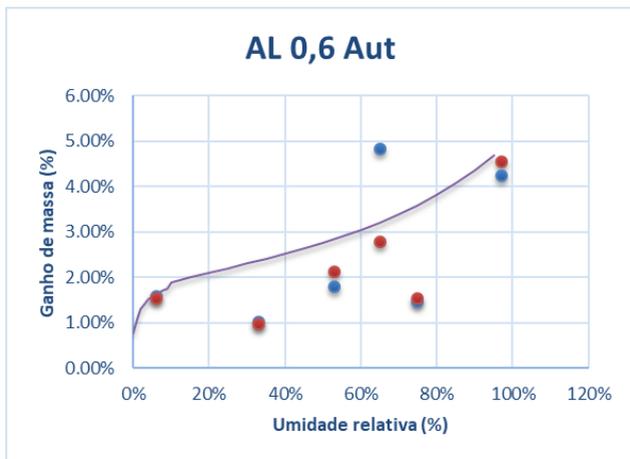
Figura 51: Gráfico da adsorção da mistura AL com as diferentes dimensões das partículas secas e na cura autógena. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)



(b)

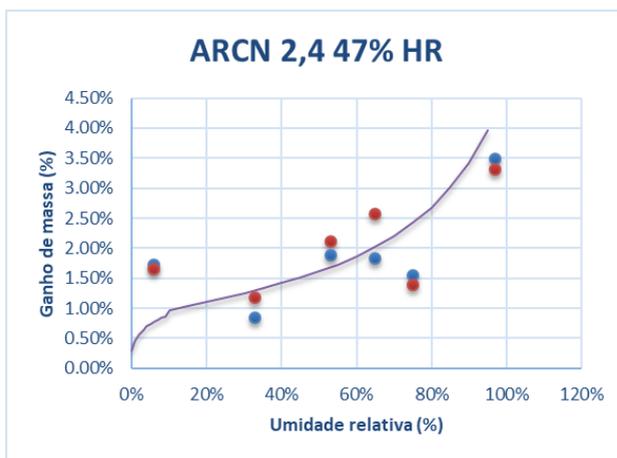


(c)

As misturas com a cura autógena resultaram em gráficos de curvas com pontos mais dispersos, diferente das misturas ARCN 2,4, ARCE 2,4 e AL 0,6. Apesar disso, como os tipos de adsorção tem comportamentos de curvas bem distintas, pode-se afirmar que todas as misturas estão classificadas como tipo II, ou seja, argamassas que apresentam macroporos em sua microestrutura.

Na Figura 52, Figura 53 e Figura 54 é possível observar, os gráficos de cada mistura que foram mantidas na cura a 47% HR.

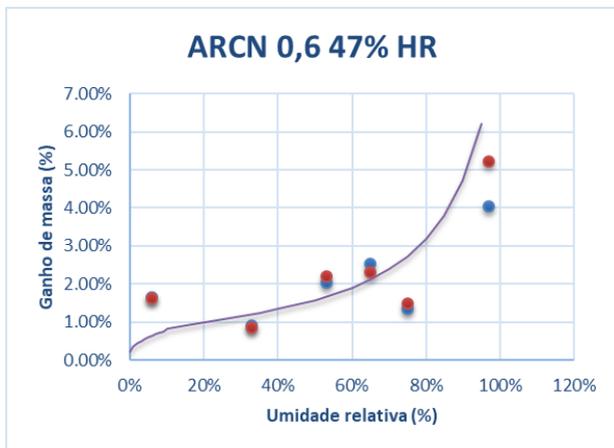
Figura 52: Gráfico da adsorção da mistura ARC� com as diferentes dimensões das partículas secas e com cura a 47% HR. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)

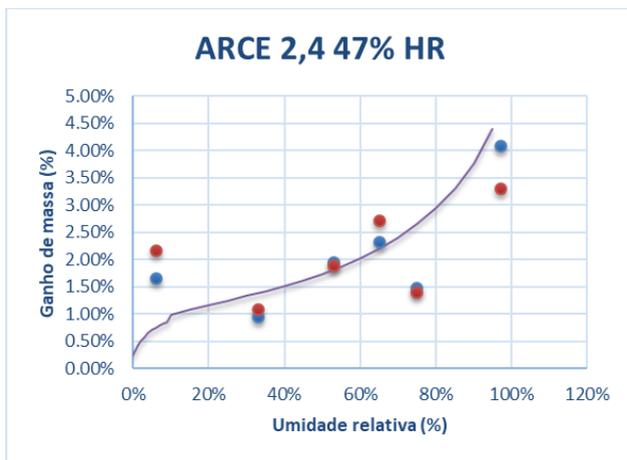


(b)

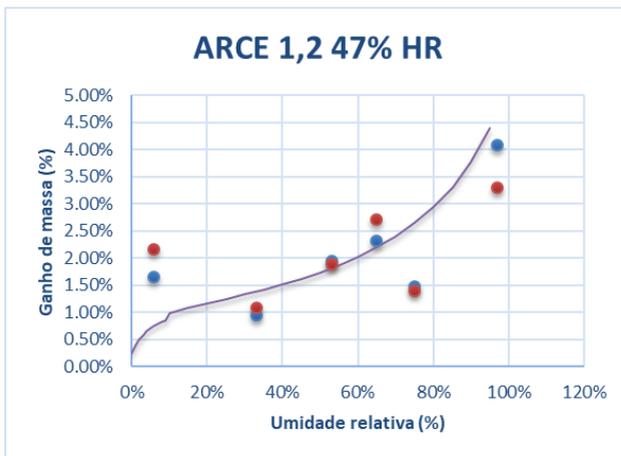


(c)

Figura 53: Gráfico da adsorção da mistura ARCE com as diferentes dimensões das partículas secas e com cura a 47% HR. (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)

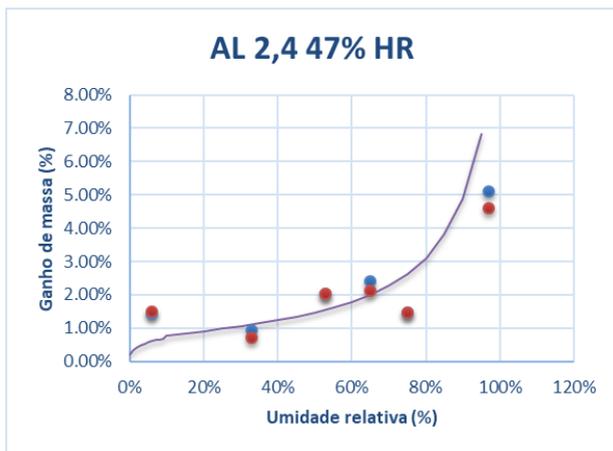


(b)

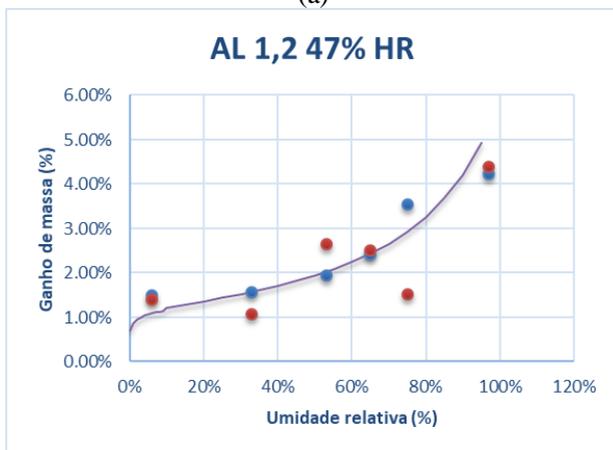


(c)

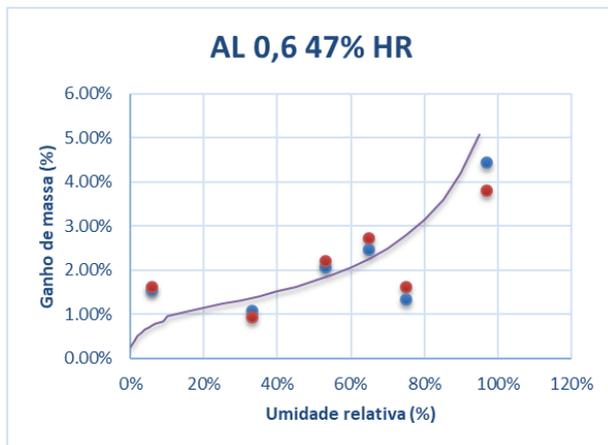
Figura 54: Gráfico da adsorção da mistura AL com as diferentes dimensões das partículas secas e com cura a 47% HR, (a) Dimensão da partícula de 2,4mm; (b) Dimensão da partícula de 1,2mm; (c) Dimensão da partícula de 0,6mm.



(a)



(b)



(c)

Estas misturas apresentaram gráficos classificados como adsorção do tipo II, ou seja, argamassas com presença de macroporos.

Com a condição seca dos agregados, percebe-se que há um aumento na variação do ganho de massa três vezes maior se comparados as misturas que utilizaram a condição de pré-molhagem dos agregados. Isto, porque, estas argamassas apresentaram uma estrutura porosa com maior área superficial, confirmando esta afirmação através dos gráficos da Figura 55 e Figura 56, onde todas as misturas com agregados reciclados e leve resultaram em uma área superficial maior que a argamassa referência em ambos os tipos de cura. No caso das argamassas com a pré-molhagem, apenas as misturas ARCN 2,4, ARCN 0,6, ARCE 1,2, AL 1,2 e AL 0,6 mantidas na cura autógena apresentaram resultados superiores de área superficial.

Figura 55: Gráfico da área superficial das amostras com cura a 47% HR e agregados secos

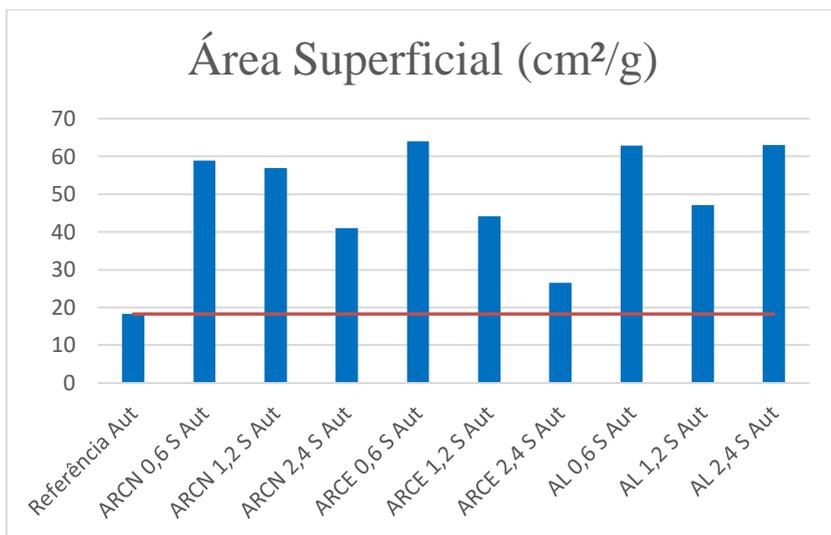
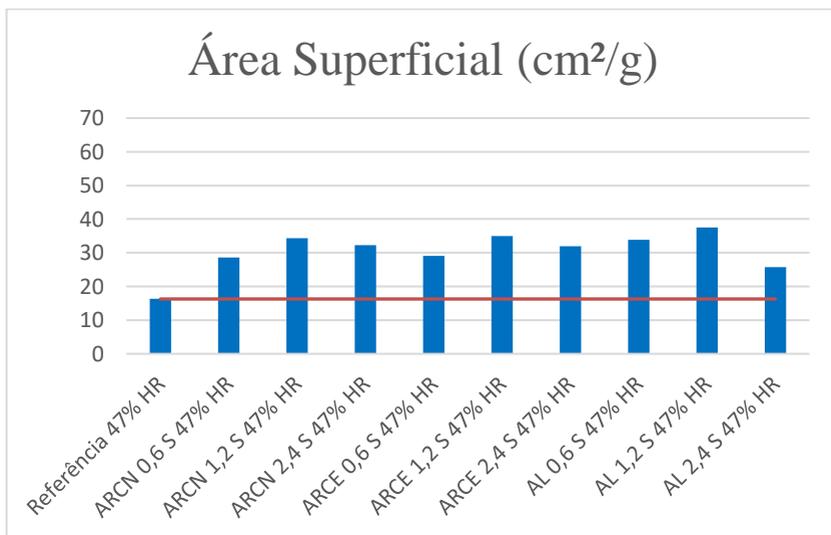


Figura 56: Gráfico da área superficial das amostras com cura a 47% HR dos agregados secos



4.4.2 Absorção por capilaridade

Na absorção por capilaridade, utilizou-se a média dos resultados (N= 3 amostras), apresentados na Figura 57, Figura 59, Figura 61, Figura 60, Figura 61 e Figura 62 comparando ARCN, ARCE e AL, de dimensões das partículas diferentes com a referência em ambas as curas e com agregados pré-molhados.

Figura 57: Absorção por capilaridade da argamassa ARCN de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura autógena)

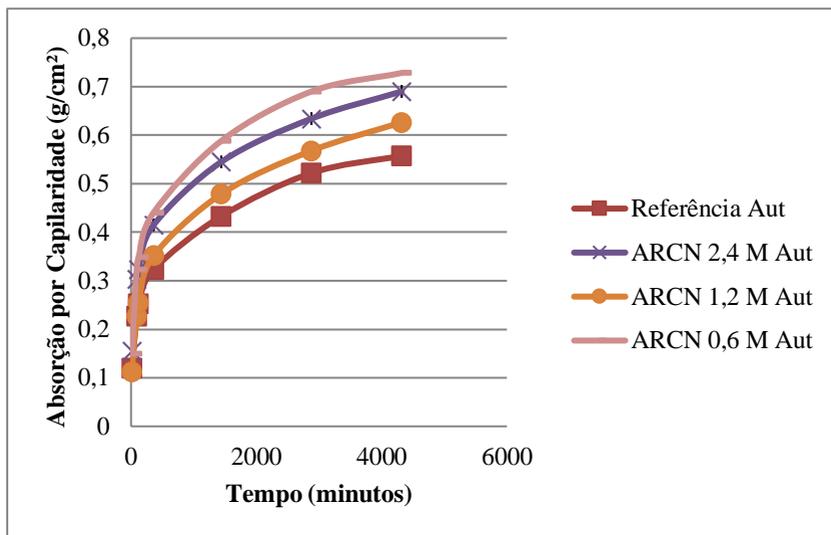


Figura 58: Absorção por capilaridade da argamassa ARCN de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura 47% HR)

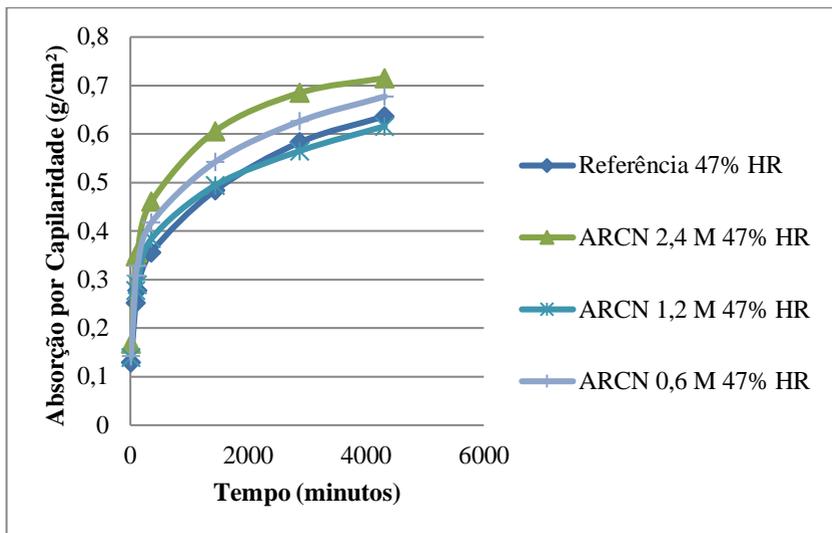


Figura 59: Absorção por capilaridade da argamassa ARCE de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura autógena)

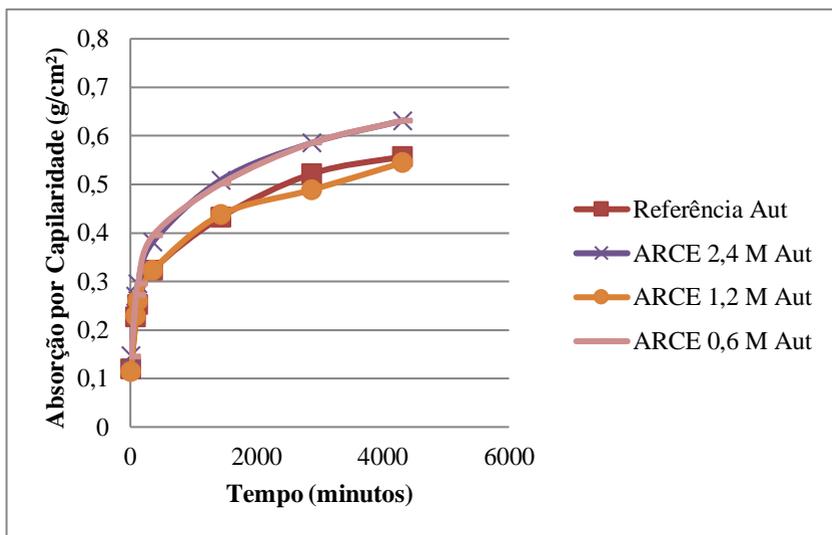


Figura 60: Absorção por capilaridade da argamassa ARCE de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura 47% HR)

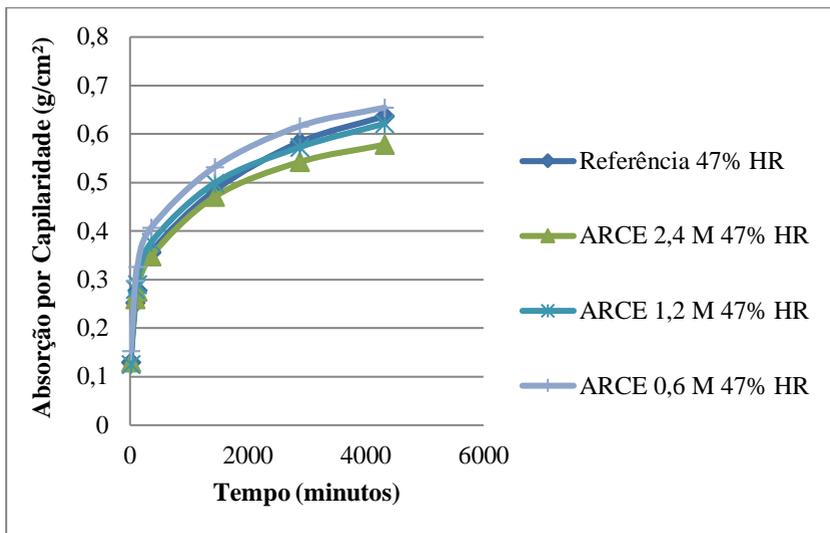


Figura 61: Absorção por capilaridade da argamassa AL de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura autógena)

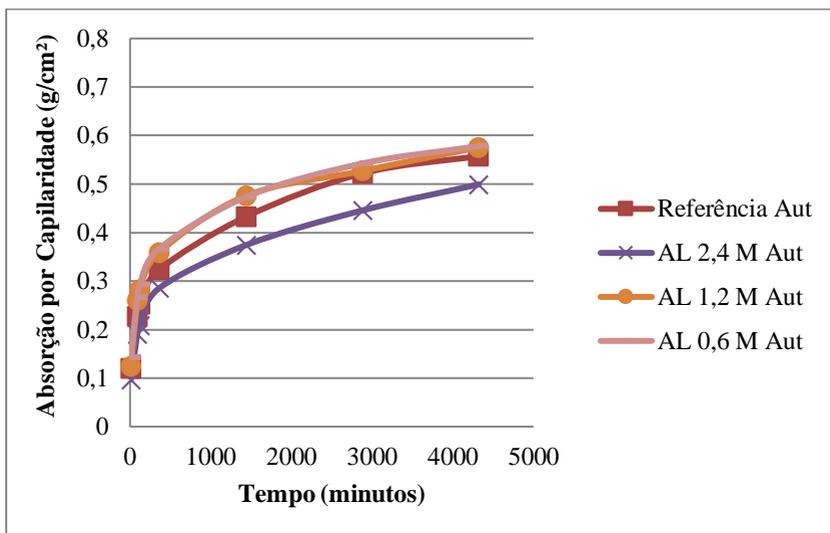
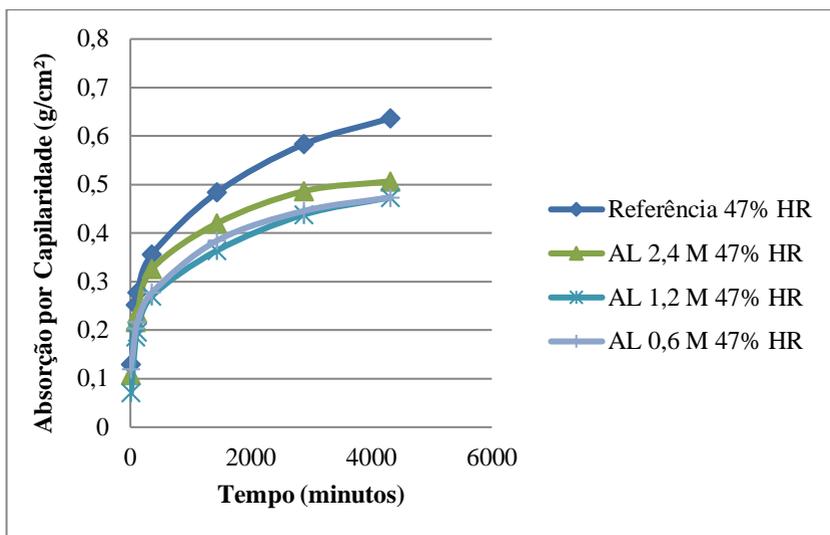


Figura 62: Absorção por capilaridade da argamassa AL de dimensões das partículas diferentes e pré-molhadas (cura 47% HR)



Referente ao tipo de cura, não houve uma grande variação nos resultados de absorção capilar. O ARCN 2,4 47% HR após 48 horas (4320 minutos) resultou em uma absorção capilar de $0,71 \text{ g/cm}^2$ e o ARCN 2,4 Aut em $0,69 \text{ g/cm}^2$. Independente da dimensão e do tipo de agregado, o tipo de cura não teve influência considerável.

Se comparar a dimensão da partícula dos agregados reciclados e leve, percebe-se que as misturas constituídas por agregados na dimensão 1,2mm apresentaram uma menor absorção capilar. As misturas com ARCN 1,2 resultaram em porcentagens de absorção capilar de 9 a 13% menores em relação as ARCN 2,4 e 0,6, independente, do tipo de cura utilizado. O ARCE 1,2 também teve menores absorções capilares comparadas as outras dimensões, que variaram de 5 a 13%, apenas a mistura ARCE 2,4 aumentou em 6,97%, quando comparada a ARCE 1,2 na cura à 47% HR. Por fim, o AL 1,2 teve resultados semelhantes ao de AL 0,6, com ambas as curas, porém AL 1,2 Aut aumentou a absorção por capilaridade em 13,27% comparado ao AL 2,4 Aut e o, AL 1,2 47% HR diminuiu em 6,53% a absorção capilar, em relação ao AL 2,4 47% HR.

Em seguida, foram avaliadas as argamassas com diferentes dimensões das partículas, diferentes agregados, dois tipos de curas e com a condição de secagem dos agregados reciclados e leves. Estes resultados

são apresentados na Figura 63, Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67 e Figura 68.

Figura 63: Absorção por capilaridade da argamassa ARCN de dimensões das partículas diferentes e secos (cura autógena)

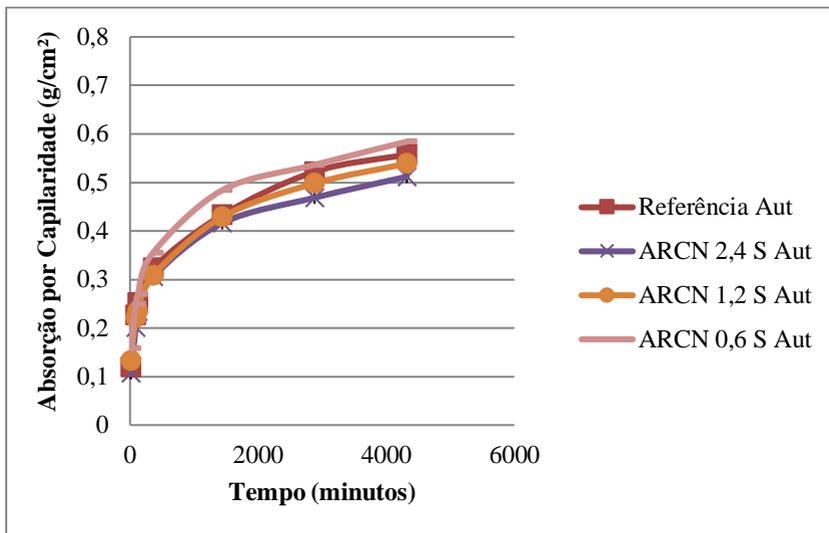


Figura 64: Absorção por capilaridade da argamassa ARCn de dimensões das partículas diferentes e secos (cura 47% HR)

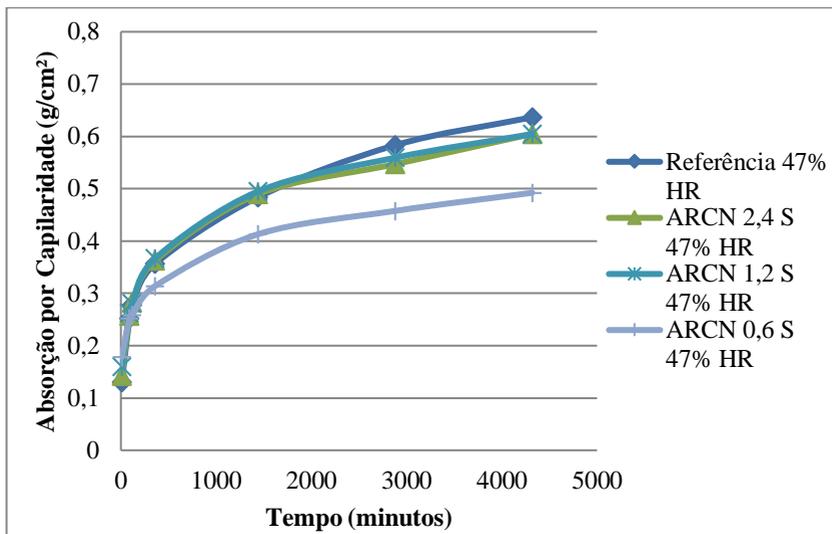


Figura 65: Absorção por capilaridade da argamassa ARCE de dimensões das partículas diferentes e secos (cura autógena)

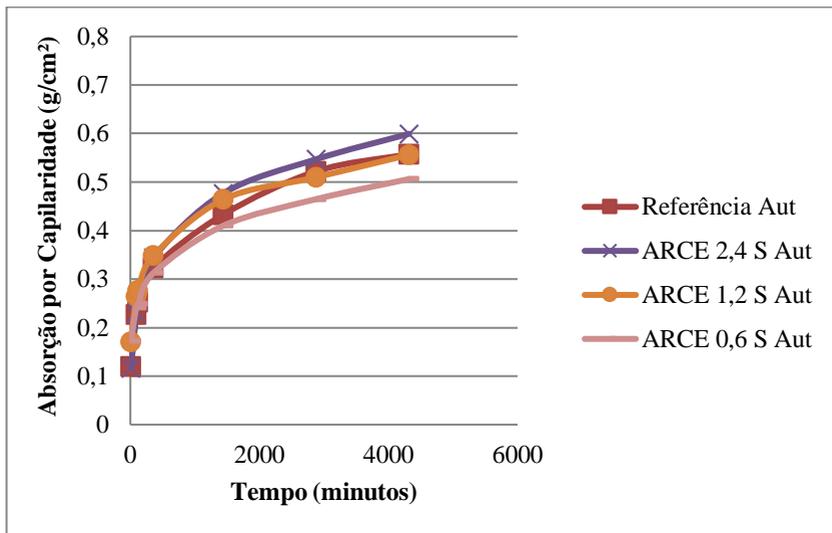


Figura 66: Absorção por capilaridade da argamassa ARCE de dimensões das partículas diferentes e secos (cura 47% HR)

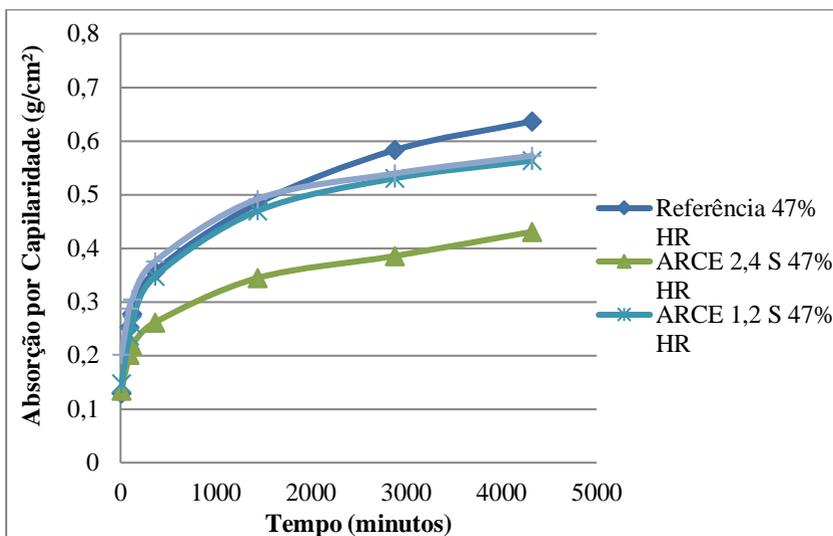


Figura 67: Absorção por capilaridade da argamassa AL de dimensões das partículas diferentes e secos (cura autógena)

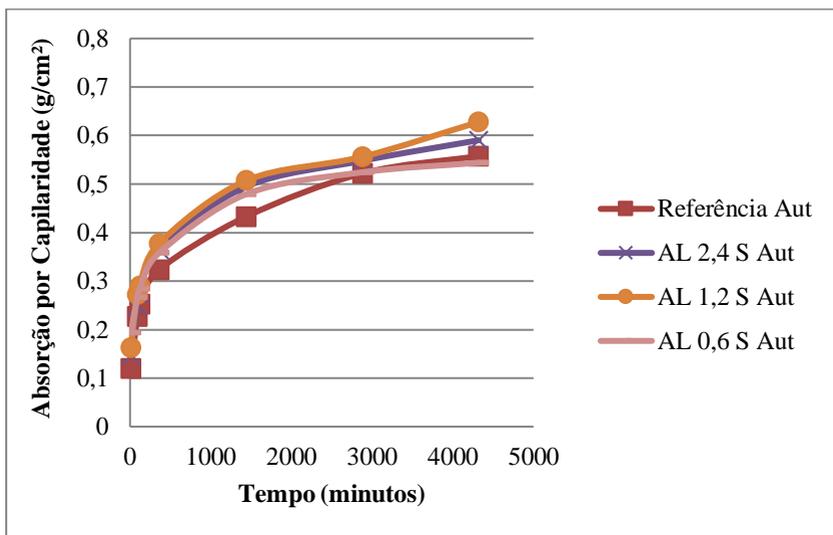
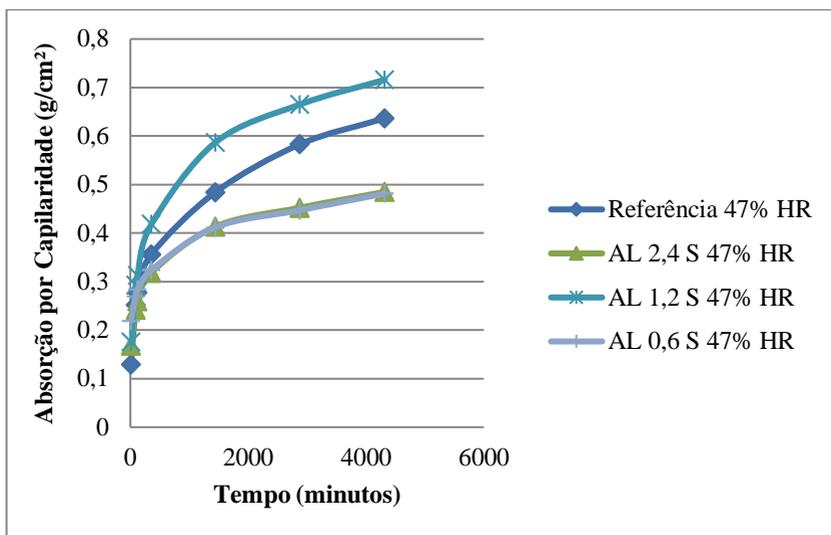


Figura 68: Absorção por capilaridade da argamassa AL de dimensões das partículas diferentes e secos (cura 47% HR)



Em relação ao tipo de cura, a maior parte das misturas com cura autógena, resultou em uma absorção por capilaridade menor (média de 0,01 g/cm² a 0,1 g/cm²), do que a cura a 47% HR. As misturas com cura à 47% HR que apresentaram valores menores que com cura autógena foram: ARCN 0,6 S 47% HR, menor em 0,1 g/cm²; ARCE 2,4 S 47% HR, menor em 0,18 g/cm²; AL 2,4 S 47% HR, menor em 0,1 g/cm²; e AL 0,6 S 47% HR, menor em 0,05 g/cm².

Os valores mais baixos de absorção por capilaridade foram os das argamassas moldadas com agregados reciclados ou leves, de dimensão da partícula de 0,6mm. A mistura de ARCN 0,6 S 47% HR resultou em uma absorção por capilaridade 22% menor comparada com a Referência 47% HR, já com a cura autógena, a ARCN 0,6 S Aut resultou em valores mais elevados. Na mistura ARCE a dimensão que resultou em uma menor absorção por capilaridade, foi a de 2,4mm na cura a 47% HR. Já nos agregados leves, a dimensão de 0,6mm e 2,4mm com cura a 47% HR, que resultaram no menor valor, tendo uma diferença de apenas 0,003 g/cm² entre elas.

Também, em ambas as situações, de um modo geral, as argamassas com agregados reciclados quando comparadas a argamassa referência resultaram em menor absorção capilar. Isso está de acordo com a revisão

da literatura de Silva, Brito e Dhir (2016), onde os autores descrevem que argamassas com agregados reciclados resultam em menor absorção capilar comparadas a argamassas com agregados naturais. Ainda explicam que, independente do agregado reciclado ter maior absorção de água, os mesmos, resultam em tamanhos de poros mais distribuídos na argamassa, os quais evitam uma maior conectividade entre eles e dificultam a ascensão capilar.

4.4.3 Porosidade aberta

O ensaio de porosidade aberta foi realizado após o término do ensaio de adsorção, nos corpos-de-prova 5Øx1cm, onde encontrou-se a absorção por imersão em água, o índice de vazios, a massa específica seca, massa específica saturada após fervura e massa específica real de cada argamassa com a pré-molhagem dos agregados. Os resultados foram apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Valores da porosidade aberta das misturas com agregados pré-molhados

Misturas	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Espec. Seca	Massa Espec. Saturada após fervura	Massa Espec. Real
Referência Aut	6,92	15,24	2,20	2,36	2,60
ARCN 2,4 M Aut	8,11	16,96	2,09	2,26	2,52
ARCN 1,2 M Aut	8,05	17,01	2,11	2,28	2,55
ARCN 0,6 M Aut	8,11	17,12	2,11	2,28	2,55
ARCE 2,4 M Aut	7,93	17,14	2,17	2,34	2,62
ARCE 1,2 M Aut	8,25	17,79	2,16	2,33	2,62
ARCE 0,6 M Aut	7,82	17,10	2,19	2,36	2,64
AL 2,4 M Aut	7,94	15,35	1,93	2,08	2,28
AL 1,2 M Aut	8,07	16,30	2,02	2,19	2,42
AL 0,6 M Aut	8,34	16,54	1,99	2,15	2,38
Referência 47%					
HR	7,10	15,00	2,12	2,27	2,49
ARCN 2,4 M 47% HR	8,04	17,35	2,17	2,34	2,62
ARCN 1,2 M 47% HR	8,14	17,16	2,11	2,28	2,55
ARCN 0,6 M 47% HR	8,42	17,30	2,06	2,23	2,49
ARCE 2,4 M 47% HR	7,98	16,87	2,12	2,29	2,55
ARCE 1,2 M 47% HR	7,79	16,41	2,11	2,27	2,52
ARCE 0,6 M 47% HR	8,04	16,74	2,08	2,25	2,50
AL 2,4 M 47% HR	8,22	16,87	2,06	2,23	2,48
AL 1,2 M 47% HR	7,76	15,37	1,99	2,14	2,35
AL 0,6 M 47% HR	8,12	16,50	2,04	2,20	2,44

A respeito da absorção por imersão em água e o índice de vazios das argamassas, as amostras não tiveram diferenças significativas. A argamassa de referência, indiferente do tipo de cura, obteve os menores

resultados, sendo que as misturas não variaram significativamente entre elas. Já em relação a massa específica, as misturas com agregados reciclados e leve resultaram em massas específicas menores em relação a argamassa referência como o esperado.

Posteriormente, foram avaliadas as argamassas com diferentes dimensões das partículas, diferentes agregados, dois tipos de curas e com a condição de secagem dos agregados reciclados e leves (Tabela 29).

Tabela 29: Valores da porosidade aberta das misturas com agregados secos

Misturas	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Espec. Seca	Massa Espec. Saturada após fervura	Massa Espec. Real
Referência Aut	6,92	15,24	2,20	2,36	2,60
ARCN 2,4 S Aut	9,47	19,71	2,08	2,28	2,59
ARCN 1,2 S Aut	10,06	21,75	2,14	2,36	2,64
ARCN 0,6 S Aut	9,74	19,90	2,05	2,25	2,56
ARCE 2,4 S Aut	9,46	19,51	2,06	2,26	2,56
ARCE 1,2 S Aut	9,51	19,30	2,04	2,24	2,55
ARCE 0,6 S Aut	9,16	19,03	2,08	2,27	2,57
AL 2,4 S Aut	10,23	19,80	1,94	2,13	2,41
AL 1,2 S Aut	9,81	19,00	1,94	2,13	2,39
AL 0,6 S Aut	9,30	18,42	1,98	2,17	2,43
Referência 47% HR	7,10	15,00	2,12	2,27	2,73
ARCN 2,4 S 47% HR	9,96	20,97	2,15	2,36	2,49
ARCN 1,2 S 47% HR	9,15	19,10	2,09	2,28	2,58
ARCN 0,6 S 47% HR	9,58	19,73	2,06	2,26	2,57
ARCE 2,4 S 47% HR	10,07	19,40	2,07	2,27	2,57
ARCE 1,2 S 47% HR	9,97	20,44	2,05	2,26	2,58
ARCE 0,6 S 47% HR	9,20	19,07	2,08	2,27	2,57
AL 2,4 S 47% HR	10,24	19,63	1,92	2,11	2,39
AL 1,2 S 47% HR	10,04	19,56	1,95	2,15	2,43
AL 0,6 S 47% HR	9,69	19,04	1,97	2,16	2,43

Em relação a absorção de água e o índice de vazios resultantes das amostras ensaiadas, não houve variação significativa, apenas se comparar as diferentes misturas com a argamassa de referência, que no caso, resultou em absorção e índice de vazios menores em até 33%. A massa específica em todas as condições de saturação apresentou valores superiores nas argamassas de referência, comparadas as misturas com agregados reciclados e leve.

Se comparar as argamassas com a condição de pré-molhagem dos agregados e as argamassas com agregados secos, pode se concluir, que a pré-molhagem resultou em argamassas com menor ligação entre os poros, que pode ser consequência de uma melhor hidratação das partículas. Sendo que, tanto no ensaio de adsorção, como no ensaio de porosidade aberta, as argamassas com a pré-molhagem dos agregados, resultaram em valores inferiores de área superficial e porosidade.

5 DISCUSSÕES FINAIS

Com base nos resultados alcançados e na análise estatística realizada, confirmou-se a hipótese inicial deste trabalho, de que o processo de pré-molhagem dos agregados, o tipo de cura e o tipo de agregado, apresentam influência direta nas propriedades no estado fresco, endurecido e na microestrutura das argamassas avaliadas. Estes são brevemente comentados a seguir:

- Caracterização dos agregados e propriedades no estado fresco:

No que se refere ao tipo de agregado, pode-se afirmar, que o ARCN apresentou uma maior absorção de água inicial na mistura, independente da dimensão das partículas utilizadas. Isto pôde ser observado nos ensaios de consistência e de ar incorporado realizados no estado fresco da argamassa. No ensaio de índice de consistência, as argamassas com a pré-molhagem dos agregados resultaram em maiores aberturas do que argamassas com agregados secos, sendo que ambos tinham a mesma quantidade de água total na mistura. Em razão disto, pode-se concluir que os agregados secos absorveram maior parte da água da mistura durante o preparo da argamassa, em relação aos agregados pré-molhados, indicando uma maior absorção inicial. Ainda, através do ensaio do ar incorporado da argamassa, as amostras com agregados secos tiveram resultados negativos, apontando que parte da água da mistura migrou para os poros dos agregados resultando em uma massa específica maior em relação à massa teórica, confirmando a capacidade de absorção de água inicial dos agregados na condição seca.

Com as misturas de ARCE, também pode-se afirmar, que há uma absorção inicial dos agregados durante o processo de mistura, porém, diferentemente do ARCN, esta absorção ocorre de maneira similar quando os agregados se encontram na condição de pré-molhagem e seca. Este comportamento pode ser observado nos ensaios de consistência da argamassa e ar incorporado. No ensaio de consistência da argamassa, os agregados na pré-molhagem resultaram em uma abertura (flow) menor do que com agregados secos, devido a parte da água da mistura estar presente nos poros do agregado, resultando em menos água livre. Por este motivo, verifica-se que, os agregados secos conseguem absorver parte da água da mistura durante o preparo da argamassa, porém é uma absorção mais lenta do que o ARCN, permitindo que fique mais água livre no processo de mistura, resultando em um flow maior. Em relação ao ensaio de ar incorporado, tanto na condição de pré-molhagem quanto na seca, os

resultados foram parecidos e negativos, confirmando que há absorção de água.

O mesmo não se pode afirmar quando se refere às argamassas com agregados leves de argila expandida, que apresentaram uma absorção de água lenta durante o processo de mistura, diferente dos agregados reciclados citados anteriormente. Quando realizado o ensaio de consistência destas misturas, os agregados com condição de pré-molhagem, resultaram em pouca abertura do flow chegando apenas a 178,5mm, principalmente porque estes agregados tem a maior absorção de água em relação aos agregados reciclados e maior quantidade de água em seus poros, a qual é inserida antes da moldagem das argamassas, diminuindo assim, a quantidade total de água livre durante a mistura, e consequentemente, sua consistência inicial. Já, na condição seca dos agregados, as argamassas obtiveram abertura de até 234mm, equivalente, as argamassas com agregados reciclados. O ensaio de ar incorporado, resultou em valores positivos, indicando que a capacidade de absorção de água destes agregados no processo de mistura, é prolongado, ou seja, com absorção inicial lenta.

- Propriedades no estado endurecido:

Em uma visão geral das propriedades mecânicas, as argamassas estudadas que apresentaram um melhor desempenho mecânico, em relação ao tipo de cura, foram aquelas mantidas em cura autógena. Em relação a pré-molhagem dos agregados, os resultados foram variados, porém na maioria dos casos as argamassas com agregados secos resultaram em resistência à compressão superior ou muito semelhante as argamassas com agregados pré-molhados.

Zhao et al. (2015) compararam argamassas com agregados reciclados secos ou pré-molhados, sendo que, os agregados na condição seca obtiveram resultados superiores de resistência à compressão enquanto na resistência à flexão os valores são quase os mesmos independente do agregado e da pré-molhagem. Estes resultados, também coincidem com os encontrados por Poon et al. (2004), e ambos os autores, apontam que a água liberada posteriormente pelos agregados pode ter causado a diminuição da resistência à compressão.

Através dos resultados da variação dimensional e de massa de cada mistura, pode-se concluir, que a variação de massa tem influência na retração ou expansão das argamassas com a cura à 47% HR, que com uma variação da massa descontínua, as misturas retraíram com a perda de massa e com o ganho de massa expandiram. Com a cura autógena, as argamassas tenderam a retrair.

Isto está de acordo com o que o autor Young (1988) estudou, referindo-se à retração de argamassas em ambientes com umidade relativa abaixo de 100%, onde ocorre a migração da água do material cimentício para o meio, resultando numa variação da massa e conseqüentemente na retração da argamassa. Já em ambientes de cura autógena, não existe troca de umidade com o meio externo, resultando assim, em uma variação dimensional menor.

Menezes et al. (2006) evidenciaram através de uma revisão da literatura que com materiais cerâmicos o fenômeno de expansão ocorre devido à redução da energia superficial com a adsorção de água em sua superfície. Isso pode ser evidenciado na retração dessas argamassas que resultaram em uma maior variação na retração e expansão quando os agregados se encontravam na condição seca e obtendo também uma maior área superficial se comparados aos agregados utilizados na pré-molhagem.

- Propriedades da microestrutura da argamassa:

Segundo a classificação da IUPAC, no caso da microestrutura, as amostras resultaram na adsorção uma estrutura macroporosa. As curvas de adsorção resultaram em um comportamento semelhante ao modelo apresentado por Freitas, Torres e Guimarães (2008), onde em umidades relativas baixas (6%) ocorreu adsorção monomolecular, evoluindo até condensação capilar com umidade relativa alta (97%).

A área superficial das argamassas, apresentaram diferentes resultados quando comparadas a diferentes curas. Com a cura autógena, a área superficial resultou em até 100% a mais, se comparada a cura a 47% HR, em ambas as condições de saturação dos agregados. Porém, quando utilizadas as argamassas com agregados reciclados e leves na condição de pré-molhagem, a área superficial diminui significativamente, em relação as argamassas com agregados na condição seca. Sugerindo que, esta condição de pré-molhagem das partículas destes agregados porosos, resultou em maior movimentação de água, pelo fato de o agregado liberar a água presente em seus poros para a mistura, ao longo da hidratação da pasta, como visto em estudos anteriores.

Em relação a absorção por capilaridade, quanto menor for à absorção de água pelas ramificações capilares da argamassa, mais resistente será o material a agentes agressivos que possam diminuir sua durabilidade. Nesse sentido, as misturas estudadas com agregados reciclados e leves, na maioria das vezes, resultaram em absorção por capilaridade menores, se comparadas a argamassa de referência.

No que se refere a porosidade aberta das argamassas, a argamassa de referência obteve os menores valores, resultando em uma argamassa

com menor ligação entre os poros em relação as misturas com agregados reciclados e leve. Já comparando as argamassas com a pré-molhagem ou secagem dos agregados, as argamassas com agregados pré-molhados apresentaram uma estrutura com menor ligação entre os poros, podendo indicar, uma melhor hidratação das partículas das argamassas. Além disso, pode-se ressaltar os resultados encontrados na área superficial, através do ensaio de adsorção, onde, argamassas com a pré-molhagem dos agregados resultaram em valores menores de área superficial em relação as argamassas com agregados secos, indicando que seus poros permeáveis são maiores.

6 CONCLUSÕES

- Ao avaliar o estado fresco das argamassas, pode se concluir, que as amostras com ARCN resultaram em uma maior absorção inicial durante o processo de mistura, já as amostras com ARCE obtiveram grande absorção do agregado no período da pré-molhagem e uma absorção menor no preparo da argamassa. Diferente dos agregados reciclados, as amostras com AL durante o processo de preparo das argamassas, quase não absorveram água da mistura;

- O estudo experimental comprovou a eficácia da substituição de agregados reciclados em porcentagens de 20% ao agregado natural, pois, as resistências à compressão, na maioria dos casos, foram superiores as da argamassa referência ou dentro do desvio padrão, independente do tipo de cura e da condição de saturação dos agregados. No estudo da variação dimensional das amostras ensaiadas, os resultados foram variados, porém, obtiveram valores parecidos quando comparados a referência e em alguns casos até inferiores;

- No ensaio de adsorção, verificou-se, através do resultado da área superficial de cada argamassa, que as amostras com agregados na condição de pré-molhagem, resultaram em valores inferiores, comparadas as amostras com agregados na condição seca. Confirmando estes resultados, o ensaio de porosidade aberta também teve valores menores quando utilizada a pré-molhagem dos agregados, indicando a presença de poros de maior diâmetro;

- Em relação aos tipos de cura, analisando o comportamento em todos os ensaios realizados, a cura que teve resultados mais significativos foi a cura autógena.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da adsorção e dessorção dos agregados utilizados no estudo;

- Realizar o ensaio de dessorção nas diferentes misturas;

- Verificar o comportamento das misturas estudadas com diferentes tipos de aditivos;

- Avaliar as propriedades mecânicas e da microestrutura em concretos com o traço utilizado, adicionando apenas brita e aditivos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados: Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - especificação**. Rio de Janeiro, 1996b.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1997.

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

_____. **NBR NM 45: Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

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

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

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

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

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

_____. NBR 15261: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)**. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. NBR 15630: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 15258: **Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13583: **Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio**. Rio de Janeiro, 2014.

ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2014) **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>> Acesso em: 05 de outubro 2016.

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Gestão de resíduos garante benefícios na construção civil**. Disponível em: <<http://sanchocom.com/sites/abrecon/gestao-de-residuos-garante-beneficios-na-construcao-civil/>> Acesso em: 03 maio 2017.

ARANDIGOYEN, Mikel; ALVAREZ, José Ignacio. Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars. **Cement and concrete research**, v. 37, n. 5, p. 767-775, 2007.

ASTM C 1498: **Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials**. 2001.

BAÍA, L.L.M; SABBATINI, F.H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. São Paulo: O Nome da Rosa, 4ª ed. 82p. 2008.

BASTOS, P.K.X. **Retração e Desenvolvimento de Propriedades Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimentos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

BALTHAR, V.K.B.L. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas**. Dissertação de Mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.

BERNARDES, Elen Elisabete. **Estudo da estrutura de poros de um compósito de matriz cimentícia por meio da microtomografia de raios x**. Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado. 2013.

BENTZ, D.P. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 285-289. 2009.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo, 1ª ed. 414p. 2010.

BRAGA, M.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 960-968. 2012.

BREUGEL, K. V.; KOENDERS, E.A.B. Numerical modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 27 n° 10, p. 1489-1499. 1997.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**, 8ª edição, Gen-LTC, 2012.

CINCOTTO, M. A. (Coord.); SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimentos: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: IPT, 1995.

CONAMA - Conselho Nacional Do Meio Ambiente. Resolução n. 307. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil**. Diário Oficial da União, Brasília. 2015.

COOK, R. A. & HOVER, K. C. Mercury porosimetry of hardened cement pastes. **Cement and Concrete research**, v. 29, n. 6, p. 933-943, 1999.

CORINALDESI, V. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 505-510.2009.

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

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

ESCSI. **Rotary kiln structural lightweight aggregate**. Disponível em: < <https://www.escsi.org/internal-curing/> > Acesso em: 03 de novembro 2018.

FELDMAN, R.F.; SEREDA, P.J. A New Model for Hydrated Portland Cement and its Practical Implications. **Engineering Journal**, Ottawa, p.52-59. 1970.

GOLIAS, M.; CASTRO, J.; WEISS, J. The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 52-62. 2012.

HENKENSIEFKEN, R.; CASTRO, J.; BENTZ, D.; NANTUNG, T.; WEISS, J. Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 883-892. 2009.

IUPAC. **Reporting Physisorption Data For Gas/Solid Systems**. v. 54, nº 11, p. 2201-2218. 1982.

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.

JOCHEM, L. F.; **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: características físicas e propriedades da microestrutura.** Dissertação de Mestrado – UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2012.

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

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering.** 5^a Edition, New York: McGraw-Hill International Editions, 1130 p., 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais.** 3^a ed. IBRACON. Português, 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 2014.

MENEZES, R. R.; CAMPOS, L. F.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Aspectos fundamentais da expansão por umidade: uma revisão Parte I: Aspectos históricos, causas e correlações. **Cerâmica** 52. p. 1-14. 2006.

MORALES, B. R. S. C. **Avaliação da influência das frações de agregado reciclado nas propriedades das argamassas de revestimento.** Dissertação de Mestrado – UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2015.

MUÑOZ-RUIPEREZ, C.; RODRÍGUEZ, A.; GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S.; CALDERÓN, V. Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 139-145. 2016.

NEPOMUCENO, M.C.S.; SILVA, P.D. Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 89-96. 2014.

- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 2ª ed. 828p. 1997.
- NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2ª ed. 448p. 2013.
- NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A.D. **Retração do concreto de cimento Portland**. São Paulo: EPUSP, 59 p. – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil; BT/PCC/452. 2007.
- PEDROSO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. Dissertação de Mestrado – UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2008.
- PICKEL, D.; TIGHE, S.; WEST, J.S. Assessing benefits of pre-soaked recycled concrete aggregate on variably cured concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 245-252. 2017.
- POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 461-468. 2004.
- POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 31-36. 2004.
- SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural silicocalcária**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1984.
- SALOMÃO, M. C. F. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água**. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Brasília/DF.2016.
- SENTONE, Daniel Tourinho. **Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de revestimentos de argamassa**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2011.

SHEN, D.; JIANG, J.; SHEN, J.; YAO, P.; JIANG, G. Influence of prewetted lightweight aggregates on the behavior and cracking potential of internally cured concrete at an early age. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 260-271. 2015.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; 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, B. A.; PINTO, AP Ferreira; GOMES, A. Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 346-360, 2015.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**, London: Thomas Telford, 2ed, 1997, 459 p.

TAZAWA, E.; SATO, R.; SAKAI, E.; MIYAZAWA, S. Work of JCI committee on autogenous shrinkage. **In: International RILEM workshop on shrinkage of concrete Shrinkage**, Paris, 2000.

THANG, L.; SÉBASTIEN, R.; GWENN, L. S.; ERIC, G. Fresh behavior of mortar based on recycled sand – Influence of moisture condition. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 35-42. 2016.

THOMSON, M. L.; LINDQVIST, J.-E.; ELSEN, J.; GROOT, C. J. W. P. Porosity of historical mortars. **13th International Brick and Block masonry Conference**. Anais. 2004.

VARGAS, P.; RESTREPO-BAENA, O.; TOBÓN, J.I. Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 381-389. 2017.

VEGAS, I.; AZKARATE, A.; JUARRERO, A.; FRIAS, M. Design and performance of masonry made with recycled concrete aggregates. **Materiales Construcción**, vol 59, p. 5-18. 2009.

YOUNG, J.F. Physical mechanisms and their mathematical descriptions. In: Z.P. Bazant. **Mathematical Modelling of Creep and Shrinkage of Concrete**, Wiley, Chichester, 1988.

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

ANEXOS

Neste item serão apresentadas as tabelas utilizadas na análise estatística a respeito da igualdade dos desvios e também da análise das médias através do método de DUNCAN para os ensaios de resistência à compressão e retração das argamassas.

Na Tabela 30 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação ao tipo de cura para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 30: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para os diferentes tipos de cura no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	Sc²	B	K₁	SQG	∑1/n_j	B/K₁	χ²_{α(K-1)}	Igualdade Variâncias
ARCN 2,4 M	7,45	2,62	1,30	103,09	0,33	2,01 <	3,84	HID
ARCN 2,4 S	2,54	0,01	1,30	6,43	0,33	0,01 <	3,84	HID
ARCN 1,2 M	13,21	3,52	1,34	97,92	0,37	2,63 <	3,84	HID
ARCN 1,2 S	2,33	2,27	1,30	13,87	0,33	1,75 <	3,84	HID
ARCN 0,6 M	1,32	0,21	1,30	2,40	0,33	0,16 <	3,84	HID
ARCN 0,6 S	8,83	1,21	1,30	8,70	0,33	0,93 <	3,84	HID
ARCE 2,4 M	18,46	5,10	1,30	210,67	0,33	3,92 >	3,84	NHID
ARCE 2,4 S	2,68	0,66	1,30	0,00	0,33	0,51 <	3,84	HID
ARCE 1,2 M	2,92	0,47	1,34	93,14	0,37	0,35 <	3,84	HID
ARCE 1,2 S	3,43	0,43	1,34	0,00	0,37	0,32 <	3,84	HID
ARCE 0,6 M	2,06	2,37	1,30	1,24	0,33	1,82 <	3,84	HID
ARCE 0,6 S	1,43	0,89	1,30	12,22	0,33	0,68 <	3,84	HID
AL 2,4 M	13,66	10,26	1,34	107,90	0,37	7,67 >	3,84	NHID
AL 2,4 S	2,635	1,6119	1,34	78,85	0,37	1,20 <	3,84	HID
AL 1,2 M	3,08	0,00	1,34	57,58	0,37	0,00 <	3,84	HID
AL 1,2 S	1,52	2,05	1,34	4,50	0,37	1,53 <	3,84	HID
AL 0,6 M	8,99	0,49	1,30	4,31	0,33	0,38 <	3,84	HID
AL 0,6 S	2,94	0,10	1,30	4,82	0,33	0,08 <	3,84	HID

HID – Aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios;

NHID – Não aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Na Tabela 31 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nas médias de cada amostra, em relação ao tipo de cura para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 31: Comparação das médias (método de DUNCAN) para os diferentes tipos de cura no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	S_{COMB}	n_h	S_x	R_k	DIFERENÇAS	
ARCN 2,4 M	2,73	6,00	1,12	3,51 - 4,33	5,86	DS
ARCN 2,4 S	1,59	6,00	0,65	2,05 - 2,52	1,46	NDS
ARCN 1,2 M	3,63	5,45	1,56	4,98 - 6,15	5,99	DS
ARCN 1,2 S	1,52	6,00	0,62	1,99 - 2,46	2,15	DS
ARCN 0,6 M	1,15	6,00	0,47	1,48 - 1,82	0,89	NDS
ARCN 0,6 S	2,97	6,00	1,21	3,82 - 4,71	1,70	NDS
ARCE 2,4 M	4,29	6,00	1,75	5,52 - 6,81	8,38	DS
ARCE 2,4 S	1,64	6,00	0,67	2,11 - 2,59	0,04	NDS
ARCE 1,2 M	1,71	5,45	0,73	2,34 - 2,89	5,88	DS
ARCE 1,2 S	1,85	5,45	0,79	2,54 - 3,13	0,03	NDS
ARCE 0,6 M	1,43	6,00	0,59	1,85 - 2,27	0,64	NDS
ARCE 0,6 S	1,19	6,00	0,49	2,19 - 2,87	2,02	NDS
AL 2,4 M	3,69	5,45	1,58	5,06 - 6,25	6,29	DS
AL 2,4 S	1,61	5,45	0,69	2,21 - 2,73	5,38	DS
AL 1,2 M	1,75	5,45	0,75	2,40 - 2,97	4,59	DS
AL 1,2 S	1,23	5,45	0,53	1,69 - 2,09	1,29	NDS
AL 0,6 M	2,99	6,00	1,22	3,87 - 4,75	1,19	NDS
AL 0,6 S	1,72	6,00	0,70	2,21 - 2,72	1,27	NDS

DS – Difere significativamente;

NDS – Não difere significativamente.

Na Tabela 32 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação a dimensão das partículas para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 32: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	Sc²	B	K₁	SQG	Σ1/n_i	B/K₁	χ²_{α(k-1)}	Igualdade Variâncias
ARCN M 47% HR	8,38	11,33	1,53	111,72	0,5000	7,39	> 5,99	NHID
ARCN M AUT	5,79	5,37	1,58	154,72	0,5333	3,39	< 5,99	HID
ARCN S 47% HR	3,71	0,42	1,53	11,99	0,5000	0,25	< 5,99	HID
ARCN S AUT	5,74	7,57	1,58	11,79	0,5333	4,79	< 5,99	HID
ARCE M 47% HR	3,64	0,04	1,58	18,04	0,5333	0,023	< 5,99	HID
ARCE M AUT	12,03	17,30	1,53	174,79	0,5000	11,28	> 5,99	NHID
ARCE S 47% HR	2,67	0,49	1,58	30,58	0,5333	0,30	< 5,99	HID
ARCE S AUT	2,31	3,23	1,53	2,55	0,5000	2,10	< 5,99	HID
AL M 47% HR	11,76	4,84	1,58	13,64	0,5333	3,06	< 5,99	HID
AL M AUT	5,43	8,49	1,58	26,46	0,5333	5,37	< 5,99	HID
AL S 47% HR	3,01	0,27	1,58	6,16	0,5333	0,17	< 5,99	HID
AL S AUT	1,74	3,52	1,58	74,91	0,5333	2,23	< 5,99	HID

HID – Aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios;

NHID – Não aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Na Tabela 33 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nas médias de cada amostra, em relação as diferentes dimensões das partículas para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 33: Comparação das médias (método de DUNCAN) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	S _{COMB}	n _h	S _x	R _k	DIMENSÕES	DIFERENÇAS
ARCN M 47% HR	2,89	6,00	1,18	3,55	1,2 com 0,6	5,50 DS
				-	1,2 com 2,4	0,47 NDS
				4,33	2,4 com 0,6	5,03 DS
ARCN M AUT	2,40	5,62	1,01	3,07	1,2 com 0,6	6,34 DS
				-	1,2 com 2,4	0,06 NDS
				3,75	2,4 com 0,6	6,28 DS
ARCN S 47% HR	1,92	6,00	0,78	2,36	1,2 com 0,6	1,96 NDS
				-	1,2 com 2,4	0,64 NDS
				2,88	2,4 com 0,6	1,32 NDS
ARCN S AUT	2,39	5,62	1,01	3,06	1,2 com 0,6	1,76 NDS
				-	1,2 com 2,4	0,04 NDS
				3,73	2,4 com 0,6	1,72 NDS
ARCE M 47% HR	1,90	5,62	0,80	2,43	1,2 com 0,6	2,20 NDS
				-	1,2 com 2,4	2,09 NDS
				2,97	2,4 com 0,6	0,10 NDS
ARCE M AUT	3,46	6,00	1,41	4,26	1,2 com 0,6	6,82 DS
				-	1,2 com 2,4	6,37 DS
				5,19	2,4 com 0,6	0,44 NDS
ARCE S 47% HR	1,63	5,62	0,68	2,08	1,2 com 0,6	2,89 DS
				-	1,2 com 2,4	0,15 NDS
				2,55	2,4 com 0,6	2,73 DS
ARCE S AUT	1,51	6,00	0,62	1,86	1,2 com 0,6	0,84 NDS
				-	1,2 com 2,4	0,09 NDS
				2,27	2,4 com 0,6	0,74 NDS
AL M 47% HR	3,42	5,62	1,44	4,38	1,2 com 0,6	1,99 NDS
				-	1,2 com 2,4	1,68 NDS
				5,35	2,4 com 0,6	0,31 NDS
AL M AUT	2,32	5,62	0,98	2,97	1,2 com 0,6	3,09 NDS
				-	1,2 com 2,4	1,38 NDS
				3,63	2,4 com 0,6	1,71 NDS
AL S 47% HR	1,73	5,62	0,73	2,21	1,2 com 0,6	1,42 NDS
				-	1,2 com 2,4	0,87 NDS
				2,70	2,4 com 0,6	0,54 NDS
AL S AUT	1,31	5,62	0,55	1,68	1,2 com 0,6	5,22 NDS
				-	1,2 com 2,4	2,00 NDS
				2,05	2,4 com 0,6	3,21 NDS

DS – Difere significativamente;

NDS – Não difere significativamente.

Na Tabela 34 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação as diferentes saturações dos agregados para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 34: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	Sc ²	B	K ₁	SQG	$\sum 1/n_j$	B/K ₁	$\chi^2_{\alpha(K-1)}$	Igualdade Variâncias
ARCN 2,4 47% HR	2,633	0,00	1,30	0,93	0,33	0,00	< 3,84	HID
ARCN 2,4 AUT	7,32	2,96	1,30	137,37	0,33	2,27	< 3,84	HID
ARCN 1,2 47% HR	12,55	3,40	1,30	55,62	0,33	2,61	< 3,84	HID
ARCN 1,2 AUT	1,96	1,31	1,37	0,53	0,40	0,95	< 3,84	HID
ARCN 0,6 47% HR	2,90	2,58	1,30	12,55	0,33	1,99	< 3,84	HID
ARCN 0,6 AUT	7,25	4,70	1,30	4,59	0,33	3,61	< 3,84	HID
ARCE 2,4 47% HR	3,66	0,00	1,30	3,35	0,33	0,00	< 3,84	HID
ARCE 2,4 AUT	17,48	8,33	1,30	162,37	0,33	6,41	> 3,84	NHDI
ARCE 1,2 47% HR	3,13	0,29	1,37	3,57	0,40	0,21	< 3,84	HID
ARCE 1,2 AUT	3,20	0,66	1,30	147,37	0,33	0,50	< 3,84	HID
ARCE 0,6 47% HR	2,66	0,31	1,30	7,55	0,33	0,24	< 3,84	HID
ARCE 0,6 AUT	0,82	0,00	1,30	0,13	0,33	0,00	< 3,84	HID
AL 2,4 47% HR	14,00	3,75	1,30	132,98	0,33	2,88	< 3,84	HID
AL 2,4 AUT	0,79	0,53	1,37	62,72	0,40	0,38	< 3,84	HID
AL 1,2 47% HR	2,87	0,03	1,37	74,80	0,40	0,02	< 3,84	HID
AL 1,2 AUT	1,83	2,66	1,30	0,50	0,33	2,05	< 3,84	HID
AL 0,6 47% HR	4,37	0,98	1,30	31,45	0,33	0,75	< 3,84	HID
AL 0,6 AUT	7,56	1,84	1,30	32,82	0,33	1,42	< 3,84	HID

HID – Aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios;

NHID – Não aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Na Tabela 35 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nas médias de cada amostra, em relação as diferentes saturações dos agregados para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 35: Comparação das médias (método de DUNCAN) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	S_{COMB}	n_h	S_x	R_k	DIFERENÇAS	
ARCN 2,4 47% HR	1,63	6,00	0,66	2,10 - 2,59	0,55	NDS
ARCN 2,4 AUT	2,70	6,00	1,10	3,48 - 4,28	6,76	DS
ARCN 1,2 47% HR	3,54	6,00	1,44	4,55 - 5,61	4,30	NDS
ARCN 1,2 AUT	1,40	5,00	0,62	2,04 - 2,53	0,46	NDS
ARCN 0,6 47% HR	1,70	6,00	0,69	2,19 - 2,69	2,04	NDS
ARCN 0,6 AUT	2,69	6,00	1,09	3,46 - 4,26	1,23	NDS
ARCE 2,4 47% HR	1,91	6,00	0,78	2,46 - 3,03	1,05	NDS
ARCE 2,4 AUT	4,18	6,00	1,70	5,37 - 6,62	7,35	DS
ARCE 1,2 47% HR	1,77	5,00	0,79	2,49 - 3,07	1,19	NDS
ARCE 1,2 AUT	1,78	6,00	0,73	2,30 - 2,83	7,00	DS
ARCE 0,6 47% HR	1,63	6,00	0,66	2,10 - 2,58	1,58	NDS
ARCE 0,6 AUT	0,90	6,00	0,37	1,14 - 1,43	0,21	NDS
AL 2,4 47% HR	3,74	6,00	1,52	4,81 - 5,92	6,65	DS
AL 2,4 AUT	0,89	5,00	0,39	1,30 - 1,61	5,00	DS
AL 1,2 47% HR	1,69	5,00	0,75	2,47 - 3,06	5,47	DS
AL 1,2 AUT	1,35	6,00	0,55	1,74 - 2,14	0,41	NDS
AL 0,6 47% HR	2,09	6,00	0,85	2,69 - 3,31	3,23	DS
AL 0,6 AUT	2,75	6,00	1,12	3,53 - 4,35	3,30	NDS

DS – Difere significativamente;
 NDS – Não difere significativamente.

Na Tabela 36 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação aos diferentes tipos de agregados para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 36: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	Sc ²	B	K ₁	SQG	$\sum 1/n_j$	B/K ₁	$\chi^2_{\alpha(K-1)}$	Igualdade Variâncias
2,4 M 47% HR	10,19	7,39	1,53	381,68	0,50	4,82	< 5,99	HID
2,4 M AUT	16,37	11,77	1,57	60,83	0,53	7,45	> 5,99	NHID
2,4 S 47% HR	3,36	0,18	1,53	38,14	0,50	0,12	< 5,99	HID
2,4 S AUT	1,79	0,70	1,57	231,29	0,53	0,44	< 5,99	HID
1,2 M 47% HR	10,41	5,03	1,62	207,31	0,56	3,10	< 5,99	HID
1,2 M AUT	2,67	0,21	1,57	71,27	0,53	0,13	< 5,99	HID
1,2 S 47% HR	2,94	0,29	1,62	54,90	0,56	0,18	< 5,99	HID
1,2 S AUT	2,04	5,11	1,57	99,43	0,53	3,23	< 5,99	HID
0,6 M 47% HR	3,53	3,51	1,53	151,47	0,50	2,29	< 5,99	HID
0,6 M AUT	4,71	9,77	1,53	122,38	0,50	6,37	> 5,99	NHID
0,6 S 47% HR	3,09	1,02	1,53	16,41	0,50	0,67	< 5,99	HID
0,6 S AUT	5,71	8,06	1,53	26,48	0,50	5,25	< 5,99	HID

HID – Aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios;

NHID – Não aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Na

Tabela 37 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nas médias de cada amostra, em relação aos diferentes tipos de agregados para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 37: Comparação das médias (método de DUNCAN) para os diferentes tipos de agredados no ensaio de resistência à compressão

AMOSTRAS	S_{COMB}	n_h	S_x	R_k	DIMENSÕES	DIFERENÇAS
2,4 M 47% HR	3,19	6,00	1,30	3,92 - 4,78	AL com ARCE	11,00 DS
					AL com ARCN	3,34 NDS
					ARCN com ARCE	7,65 DS
2,4 M AUT	4,04	5,62	1,70	5,17 - 6,31	AL com ARCE	4,49 NDS
					AL com ARCN	3,66 NDS
					ARCN com ARCE	0,82 NDS
2,4 S 47% HR	1,83	6,00	0,74	2,25 - 2,75	AL com ARCE	3,28 DS
					AL com ARCN	2,84 DS
					ARCN com ARCE	0,44 NDS
2,4 S AUT	1,33	5,62	0,56	1,71 - 2,09	AL com ARCE	8,69 DS
					AL com ARCN	1,41 NDS
					ARCN com ARCE	7,28 DS
1,2 M 47% HR	3,22	5,29	1,40	4,29 - 5,23	AL com ARCE	8,59 DS
					AL com ARCN	6,75 DS
					ARCN com ARCE	1,84 NDS
1,2 M AUT	1,63	5,62	0,68	2,09 - 2,55	AL com ARCE	5,08 DS
					AL com ARCN	3,23 DS
					ARCN com ARCE	1,84 NDS
1,2 S 47% HR	1,71	5,29	0,74	2,28 - 2,78	AL com ARCE	4,32 DS
					AL com ARCN	3,64 DS
					ARCN com ARCE	0,67 NDS
1,2 S AUT	1,42	5,62	0,60	1,82 - 2,23	AL com ARCE	5,57 DS
					AL com ARCN	1,46 NDS
					ARCN com ARCE	4,11 DS
0,6 M 47% HR	1,88	6,00	0,76	2,31 - 2,81	AL com ARCE	6,80 DS
					AL com ARCN	1,61 NDS
					ARCN com ARCE	5,18 DS

						AL com ARCE	6,24	DS
0,6 M AUT	2,17	6,00	0,8866	2,66 - 3,25		AL com ARCN	1,96	NDS
						ARCN com ARCE	4,2830	DS
						AL com ARCE	2,0730	NDS
0,6 S 47% HR	1,7590	6,0000	0,7181	2,162 - 2,635		AL com ARCN	1,9750	NDS
						ARCN com ARCE	0,0980	NDS
						AL com ARCE	2,7250	NDS
0,6 S AUT	2,3897	6,0000	0,9756	2,937 - 3,580		AL com ARCN	2,3880	NDS
						ARCN com ARCE	0,3370	NDS

DS – Difere significativamente;
NDS – Não difere significativamente.

Na Tabela 38 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação ao tipo de cura para o ensaio de retração.

Tabela 38: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para os diferentes tipos de cura no ensaio de retração

AMOSTRAS	Sc ²	B	K ₁	SQG	$\sum 1/n_j$	B/K ₁	$\chi^2_{\alpha(k-1)}$	Igualdade Variâncias
ARCN 2,4 M	0,06	4,58	2,16	0,36	0,83	2,11	< 3,84	HID
ARCN 2,4 S	0,10	1,20	2,50	0,00	1,00	0,48	< 3,84	HID
ARCN 1,2 M	0,02	0,85	2,16	0,72	0,83	0,39	< 3,84	HID
ARCN 1,2 S	0,12	2,82	2,50	0,71	1,00	1,13	< 3,84	HID
ARCN 0,6 M	0,01	6,81	2,16	0,40	0,83	3,14	< 3,84	HID
ARCN 0,6 S	0,00	1,06	2,50	0,13	1,00	0,42	< 3,84	HID
ARCE 2,4 M	0,00	0,48	1,75	0,31	0,66	0,27	< 3,84	HID
ARCE 2,4 S	0,05	0,40	2,16	0,35	0,83	0,18	< 3,84	HID
ARCE 1,2 M	0,00	0,06	2,50	0,22	1,00	0,02	< 3,84	HID
ARCE 1,2 S	0,06	0,74	2,50	0,19	1,00	0,29	< 3,84	HID
ARCE 0,6 M	0,00	0,99	2,16	0,14	0,83	0,45	< 3,84	HID
ARCE 0,6 S	0,16	3,73	2,16	0,16	0,83	1,72	< 3,84	HID
AL 2,4 M	0,00	1,08	2,16	0,52	0,83	0,50	< 3,84	HID
AL 2,4 S	0,32	5,20	2,16	1,88	0,83	2,40	< 3,84	HID
AL 1,2 M	0,00	4,87	2,16	0,43	0,83	2,25	< 3,84	HID
AL 1,2 S	0,00	0,44	2,50	0,00	1,00	0,17	< 3,84	HID
AL 0,6 M	0,10	3,77	2,50	0,00	1,00	1,51	< 3,84	HID

AL 0,6 S 0,04 2,88 2,16 0,04 0,83 1,33 < 3,84 HID

HID – Aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios;

NHID – Não aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Na Tabela 39 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nas médias de cada amostra, em relação ao tipo de cura para o ensaio de retração.

Tabela 39: Comparação das médias (método de DUNCAN) para os diferentes tipos de cura no ensaio de retração

AMOSTRAS	S_{COMB}	n_h	S_x	R_k	DIFERENÇAS
ARCN 2,4 M	0,25	2,40	0,16	0,73 - 0,95	0,54 NDS
ARCN 2,4 S	0,32	2,00	0,23	1,42 - 1,93	0,04 NDS
ARCN 1,2 M	0,14	2,40	0,09	0,43 - 0,56	0,77 DS
ARCN 1,2 S	0,35	2,00	0,25	1,54 - 2,09	0,84 NDS
ARCN 0,6 M	0,13	2,40	0,08	0,39 - 0,51	0,58 DS
ARCN 0,6 S	0,02	2,00	0,01	0,10 - 0,14	0,37 DS
ARCE 2,4 M	0,07	3,00	0,04	0,16 - 0,20	0,45 DS
ARCE 2,4 S	0,23	2,40	0,14	0,67 - 0,87	0,54 NDS
ARCE 1,2 M	0,05	2,00	0,03	0,23 - 0,32	0,47 DS
ARCE 1,2 S	0,24	2,00	0,17	1,06 - 1,44	0,43 NDS
ARCE 0,6 M	0,09	2,40	0,06	0,28 - 0,36	0,34 DS
ARCE 0,6 S	0,40	2,40	0,26	1,18 - 1,54	0,37 NDS
AL 2,4 M	0,02	2,40	0,01	0,07 - 0,09	0,65 DS
AL 2,4 S	0,56	2,40	0,36	1,64 - 2,14	1,25 NDS
AL 1,2 M	0,05	2,40	0,03	0,15 - 0,19	0,60 DS
AL 1,2 S	0,04	2,00	0,03	0,21 - 0,28	0,01 NDS
AL 0,6 M	0,31	2,00	0,22	1,36 - 1,86	0,06 NDS
AL 0,6 S	0,21	2,40	0,13	0,62 - 0,81	0,19 NDS

DS – Difere significativamente;

NDS – Não difere significativamente.

Na Tabela 40 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação as diferentes dimensões das partículas para o ensaio de retração.

Tabela 40: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de retração

AMOSTRAS	Sc²	B	K₁	SQG	∑1/n_j	B/K₁	χ²_{a(K-1)}	Igualdade Variâncias
ARCN M 47% HR	0,05	1,00	2,33	0,04	1,00	0,42	< 5,99	HID
ARCN M AUT	0,00	2,29	3,66	0,00	1,50	0,62	< 5,99	HID
ARCN S 47% HR	0,06	8,12	3,66	0,09	1,50	2,21	< 5,99	HID
ARCN S AUT	0,09	4,96	3,66	1,86	1,50	1,35	< 5,99	HID
ARCE M 47% HR	0,00	1,62	2,80	0,02	1,16	0,57	< 5,99	HID
ARCE M AUT	0,00	0,60	3,25	0,00	1,33	0,18	< 5,99	HID
ARCE S 47% HR	0,13	1,79	2,80	0,89	1,16	0,64	< 5,99	HID
ARCE S AUT	0,03	2,95	3,66	0,45	1,50	0,80	< 5,99	HID
AL M 47% HR	0,00	1,28	2,80	0,04	1,16	0,45	< 5,99	HID
AL M AUT	0,06	14,31	3,66	0,68	1,50	3,90	< 5,99	HID
AL S 47% HR	0,24	8,10	3,25	2,52	1,33	2,49	< 5,99	HID
AL S AUT	0,03	6,00	3,25	0,02	1,33	1,84	< 5,99	HID

HID – Aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios;

NHID – Não aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Na Tabela 41 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nas médias de cada amostra, em relação as diferentes dimensões das partículas para o ensaio de retração.

Tabela 41: Comparação das médias (método de DUNCAN) para as diferentes dimensões das partículas no ensaio de retração

AMOSTRAS	S _{COMB}	n _h	S _x	Rk	DIMENSÕES	DIFERENÇAS
ARCN M 47% HR	0,22	3,00	0,13	0,45 - 0,56	1,2 com 0,6	0,16 NDS
					1,2 com 2,4	0,14 NDS
					2,4 com 0,6	0,01 NDS
ARCN M AUT	0,01	2,00	0,00	0,04 - 0,05	1,2 com 0,6	0,07 DS
					1,2 com 2,4	0,04 DS
					2,4 com 0,6	0,03 NDS
ARCN S 47% HR	0,26	2,00	0,21	0,82 - 1,08	1,2 com 0,6	0,27 NDS
					1,2 com 2,4	0,01 NDS
					2,4 com 0,6	0,26 NDS
ARCN S AUT	0,30	2,00	0,21	0,95 - 1,25	1,2 com 0,6	1,20 NDS
					1,2 com 2,4	1,15 DS
					2,4 com 0,6	0,05 NDS
ARCE M 47% HR	0,08	2,57	0,05	0,18 - 0,23	1,2 com 0,6	0,12 NDS
					1,2 com 2,4	0,03 NDS
					2,4 com 0,6	0,09 NDS
ARCE M AUT	0,07	2,25	0,04	0,18 - 0,23	1,2 com 0,6	0,04 NDS
					1,2 com 2,4	0,01 NDS
					2,4 com 0,6	0,03 NDS
ARCE S 47% HR	0,36	2,57	0,22	0,82 - 1,03	1,2 com 0,6	0,69 NDS
					1,2 com 2,4	0,68 NDS
					2,4 com 0,6	0,00 NDS
ARCE S AUT	0,19	2,00	0,13	0,61 - 0,80	1,2 com 0,6	0,62 NDS
					1,2 com 2,4	0,52 NDS
					2,4 com 0,6	0,09 NDS
AL M 47% HR	0,04	2,57	0,02	0,10 - 0,13	1,2 com 0,6	0,16 DS
					1,2 com 2,4	0,06 NDS
					2,4 com 0,6	0,10 NDS
AL M AUT	0,25	2,00	0,18	0,82 - 1,07	1,2 com 0,6	0,76 NDS
					1,2 com 2,4	0,66 NDS
					2,4 com 0,6	0,10 NDS
AL S 47% HR	0,49	2,25	0,32	1,28 - 1,63	1,2 com 0,6	1,24 NDS
					1,2 com 2,4	0,05 NDS
					2,4 com 0,6	1,18 NDS
AL S AUT	0,18	2,25	0,12	0,48 - 0,61	1,2 com 0,6	0,13 NDS
					1,2 com 2,4	0,12 NDS
					2,4 com 0,6	0,00 NDS

DS – Difere significativamente; NDS – Não difere significativamente.

Na Tabela 42 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação as diferentes saturações dos agregados para o ensaio de retração.

Tabela 42: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de retração

AMOSTRAS	Sc ²	B	K ₁	SQG	$\sum 1/n_j$	B/K ₁	$\chi^2_{\alpha(k-1)}$	Igualdade Variâncias
ARCN 2,4 47% HR	0,14	0,13	2,50	0,49	1,00	0,05	< 3,84	HID
ARCN 2,4 AUT	0,01	2,92	2,16	0,04	0,83	1,34	< 3,84	HID
ARCN 1,2 47% HR	0,02	1,05	2,16	0,41	0,83	0,48	< 3,84	HID
ARCN 1,2 AUT	0,12	5,39	2,50	1,07	1,00	2,15	< 3,84	HID
ARCN 0,6 47% HR	0,01	4,21	2,16	0,20	0,83	1,94	< 3,84	HID
ARCN 0,6 AUT	0,00	3,48	2,50	0,04	1,00	1,39	< 3,84	HID
ARCE 2,4 47% HR	0,01	2,53	1,75	0,30	0,66	1,44	< 3,84	HID
ARCE 2,4 AUT	0,06	1,44	2,16	0,35	0,83	0,66	< 3,84	HID
ARCE 1,2 47% HR	0,05	2,48	2,50	0,16	1,00	0,99	< 3,84	HID
ARCE 1,2 AUT	0,01	0,50	2,50	0,24	1,00	0,20	< 3,84	HID
ARCE 0,6 47% HR	0,13	3,29	1,75	0,19	0,66	1,88	< 3,84	HID
ARCE 0,6 AUT	0,00	0,00	2,50	1,18	1,00	0,00	< 3,84	HID
AL 2,4 47% HR	0,24	9,92	1,75	4,74	0,66	5,67	> 3,84	NHDI
AL 2,4 AUT	0,00	0,91	2,50	0,01	1,00	0,36	< 3,84	HID
AL 1,2 47% HR	0,00	0,00	2,16	0,16	0,83	0,00	< 3,84	HID
AL 1,2 AUT	0,00	3,30	2,50	0,05	1,00	1,32	< 3,84	HID
AL 0,6 47% HR	0,00	0,00	2,50	0,27	1,00	0,00	< 3,84	HID
AL 0,6 AUT	0,13	0,27	2,50	0,15	1,00	0,11	< 3,84	HID

HID – Aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios;

NHID – Não aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Na Tabela 43 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nas médias de cada amostra, em relação as diferentes saturações dos agregados para o ensaio de retração.

Tabela 43: Comparação das médias (método de DUNCAN) para as diferentes saturações dos agregados no ensaio de retração

AMOSTRAS	S_{COMB}	n_h	S_x	R_k	DIFERENÇAS	
ARCN 2,4 47% HR	0,38	2,00	0,27	1,65 - 2,24	0,70	NDS
ARCN 2,4 AUT	0,10	2,40	0,07	0,31 - 0,41	0,19	NDS
ARCN 1,2 47% HR	0,14	2,40	0,09	0,43 - 0,56	0,58	DS
ARCN 1,2 AUT	0,35	2,00	0,25	1,53 - 2,08	1,03	NDS
ARCN 0,6 47% HR	0,13	2,40	0,08	0,39 - 0,51	0,41	DS
ARCN 0,6 AUT	0,02	2,00	0,01	0,10 - 0,14	0,20	DS
ARCE 2,4 47% HR	0,13	3,00	0,07	0,30 - 0,38	0,45	DS
ARCE 2,4 AUT	0,25	2,40	0,16	0,74 - 0,97	0,54	NDS
ARCE 1,2 47% HR	0,23	2,00	0,16	1,00 - 1,36	0,41	NDS
ARCE 1,2 AUT	0,10	2,00	0,07	0,43 - 0,59	0,49	DS
ARCE 0,6 47% HR	0,36	3,00	0,20	0,81 - 1,04	0,36	NDS
ARCE 0,6 AUT	0,04	2,00	0,02	0,18 - 0,24	1,08	DS
AL 2,4 47% HR	0,49	3,00	0,28	1,11 - 1,41	1,17	DS
AL 2,4 AUT	0,02	2,00	0,01	0,09 - 0,12	0,13	DS
AL 1,2 47% HR	0,06	2,40	0,04	0,18 - 0,23	0,37	DS
AL 1,2 AUT	0,02	2,00	0,01	0,09 - 0,12	0,23	DS
AL 0,6 47% HR	0,03	2,00	0,02	0,14 - 0,19	0,52	DS
AL 0,6 AUT	0,36	2,00	0,25	1,57 - 2,14	0,39	NDS

DS – Difere significativamente;

NDS – Não difere significativamente.

Na Tabela 44 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade dos desvios de cada amostra, em relação as diferentes tipos de agregados para o ensaio de retração.

Tabela 44: Teste de Bartlett (igualdade dos desvios) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de retração

AMOSTRAS	Sc ²	B	K ₁	SQG	$\sum 1/n_j$	B/K ₁	$\chi^2_{\alpha(k-1)}$	Igualdade Variâncias
2,4 M 47% HR	0,03	10,19	2,33	0,06	1,00	4,36	< 5,99	HID
2,4 M AUT	0,00	4,87	3,25	0,00	1,33	1,50	< 5,99	HID
2,4 S 47% HR	0,24	2,88	2,80	2,19	1,16	1,03	< 5,99	HID
2,4 S AUT	0,03	3,71	3,66	0,51	1,50	1,01	< 5,99	HID
1,2 M 47% HR	0,01	2,89	2,80	0,13	1,16	1,03	< 5,99	HID
1,2 M AUT	0,00	5,57	3,66	0,00	1,50	1,51	< 5,99	HID
1,2 S 47% HR	0,03	5,19	3,66	0,02	1,50	1,41	< 5,99	HID
1,2 S AUT	0,09	5,18	3,66	0,76	1,50	1,41	< 5,99	HID
0,6 M 47% HR	0,01	2,04	2,80	0,11	1,16	0,72	< 5,99	HID
0,6 M AUT	0,06	11,46	3,66	0,59	1,50	3,12	< 5,99	HID
0,6 S 47% HR	0,12	10,22	3,25	0,59	1,33	3,14	< 5,99	HID
0,6 S AUT	0,03	5,04	3,25	1,71	1,33	1,55	< 5,99	HID

HID – Aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios;
 NHID – Não aceita-se a hipótese de igualdade dos desvios.

Na Tabela 45 estão apresentados os resultados encontrados para avaliar se há igualdade nas médias de cada amostra, em relação as diferentes tipos de agregados para o ensaio de retração.

Tabela 45: Comparação das médias (método de DUNCAN) para os diferentes tipos de agregados no ensaio de retração

AMOSTRAS	S _{COMB}	n _h	S _x	R _k	DIMENSÕES	DIFERENÇAS
2,4 M 47% HR	0,18	3,00	0,10	0,36 - 0,45	AL com ARCE	0,19 NDS
					AL com ARCN	0,07 NDS
					ARCN com ARCE	0,12 NDS
2,4 M AUT	0,06	2,25	0,04	0,16 - 0,20	AL com ARCE	0,03 NDS
					AL com ARCN	0,03 NDS
					ARCN com ARCE	0,00 NDS
2,4 S 47% HR	0,49	2,57	0,30	1,11 - 1,40	AL com ARCE	1,12 NDS
					AL com ARCN	0,12 NDS
					ARCN com ARCE	1,00 NDS
2,4 S AUT	0,19	2,00	0,13	0,61 - 0,80	AL com ARCE	0,71 NDS
					AL com ARCN	0,41 NDS
					ARCN com ARCE	0,29 NDS
1,2 M 47% HR	0,12	2,57	0,07	0,27 - 0,34	AL com ARCE	0,30 NDS
					AL com ARCN	0,23 NDS
					ARCN com ARCE	0,07 NDS
1,2 M AUT	0,03	2,00	0,02	0,11 - 0,15	AL com ARCE	0,06 NDS
					AL com ARCN	0,00 NDS
					ARCN com ARCE	0,06 NDS
1,2 S 47% HR	0,19	2,00	0,13	0,61 - 0,79	AL com ARCE	0,13 NDS
					AL com ARCN	0,02 NDS
					ARCN com ARCE	0,10 NDS
1,2 S AUT	0,30	2,00	0,21	0,95 - 1,24	AL com ARCE	0,86 NDS
					AL com ARCN	0,54 NDS
					ARCN com ARCE	0,31 NDS
0,6 M 47% HR	0,12	2,57	0,07	0,28 - 0,36	AL com ARCE	0,26 NDS
					AL com ARCN	0,02 NDS
					ARCN com ARCE	0,23 NDS
0,6 M AUT	0,25	2,00	0,18	0,82 - 1,07	AL com ARCE	0,67 NDS
					AL com ARCN	0,67 NDS

					ARCN com ARCE	0,00	NDS
					AL com ARCE	0,63	NDS
0,6 S 47% HR	0,35	2,25	0,23	0,92 - 1,17	AL com ARCN	0,54	NDS
					ARCN com ARCE	0,09	NDS
					AL com ARCE	1,28	DS
0,6 S AUT	0,18	2,25	0,12	0,48 - 0,62	AL com ARCN	0,81	DS
					ARCN com ARCE	0,47	NDS

DS – Difere significativamente;

NDS – Não difere significativamente.