



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**MARIANNA LUNA SOUSA RIVETTI**

**ANÁLISE TEÓRICA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM  
DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO**

Salvador

2022

**MARIANNA LUNA SOUSA RIVETTI**

**ANÁLISE TEÓRICA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM  
DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica Batista Leite.

Agência Financiadora: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Salvador

2022

---

R624 Rivetti, Marianna Luna Sousa.

Análise teórica da retração por secagem do concreto com agregado reciclado / Marianna Luna Sousa Rivetti. – Salvador, 2022.  
294 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima.

Coorientadora: Profa. Dra. Mônica Batista Leite.

Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2022.

1. Resíduos da construção civil - reaproveitamento. 2. Concreto. 3. Retração por secagem. 4. Agregado reciclado. I. Lima, Paulo Roberto Lopes. II. Leite, Mônica Batista. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

---

CDD: 628.44

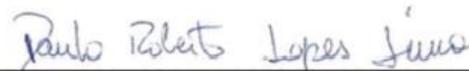
**MARIANNA LUNA SOUSA RIVETTI.**

**ANÁLISE TEÓRICA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM  
DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

Aprovada em 23/02/2022.

**BANCA EXAMINADORA**



Prof.(a) Dr.(a) **Paulo Roberto Lopes Lima**

**Orientador**

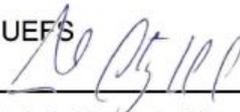
PPEC-UFBA



Prof.(a) Dr.(a) **Mônica Batista Leite**

**Coorientadora**

PPGEC- UEFS



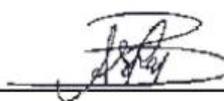
Prof.(a) Dr.(a) **Marcelo Strozi Cilla**

PPEC-UFBA



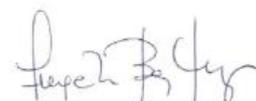
Prof.(a) Dr.(a) **Marco Pepe**

Università degli Studi di Salerno



Prof.(a) Dr.(a) **Aline da Silva Ramos Barboza**

PPGEC/UFAL



Prof.(a) Dr.(a) **Angela Borges Masuero**

PPGEC (UFRGS)

Dedico este trabalho a minha mãe (*in memoriam*),  
pois se eu acreditei que conseguiria foi  
por que ela acreditou primeiro em mim,  
e a meus filhos, que se tornaram a  
maior motivação para seguir em frente  
mesmo em meio a tantas dificuldades.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me sustentar durante esses longos anos e sobretudo nos últimos dois anos, enfrentando pandemia, doença, efeitos pós-covid e perda de entes queridos. Experimentei verdadeiros milagres para a conclusão desse texto.

À minha mãe que apesar de ter partido um ano antes do meu ingresso no doutorado, sempre acreditou em mim e sempre me incentivou a buscar meus sonhos e objetivos sem me deixar abater frente as dificuldades. Ela é meu exemplo e inspiração.

Aos meus filhos Leonardo e Gustavo que me motivam a cada dia a persistir nos objetivos traçados, por todo carinho, amor e compreensão. Eles são minha fortaleza.

À minha irmã Manuela, por todo apoio ao longo desses anos.

Ao meu avô e meu pai que partiram durante o desenvolvimento deste texto, e que se tornam mais um motivo para não desistir frente as dificuldades encontradas.

À Alana Grochowalski por todo apoio para a realização da parte experimental e parceria de trabalhos.

À Beatriz Lago que colaborou com a tese desde o projeto de iniciação científica ao trabalho de conclusão de curso, assim como viagens a Feira de Santana para a parte experimental, artigos publicados e amizade.

Aos meus alunos que participaram através do trabalho de conclusão de curso e artigos publicados.

Aos colegas de doutorado e parceiros de laboratório por estarem sempre dispostos a tirar dúvidas e ajudar no que fosse necessário. Em especial minhas amigas Bruna Bueno Mariani e Caroline Sena.

Agradeço todo apoio e disponibilidade dos meus orientadores Paulo e Mônica.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFBA, pelas aulas ministradas com dedicação, por disponibilizarem tempo para esclarecer dúvidas e por todo conhecimento transmitido.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A todos que caminharam comigo ao longo desses anos, amigos que Deus colocou no meu caminho. Não preciso citar nomes de todos, eles sabem o quanto foram importantes, seja durante as disciplinas, no laboratório, viagens para Feira de Santana para a parte experimental, congressos, orientação de trabalho de conclusão de curso, artigos publicados, parceria de trabalho, orações, palavras de força, conversas, todo apoio que tive durante todos esses anos.

Sozinhos não conseguimos chegar a lugar nenhum, a caminhada é nossa, cada um tem a sua, mas na estrada há muitas pessoas e todas elas acabam de alguma forma fazendo parte da nossa história e das nossas conquistas.

GRATIDÃO!!!

“Sem a curiosidade que me move, que me inquieta, que me insere na busca, não aprendo nem ensino.” (Paulo Freire, 1996, p.85)

## RESUMO

A indústria da construção civil é considerada grande causadora de degradação ambiental, desta forma, o setor tem se voltado ao desenvolvimento sustentável com o objetivo de diminuir os impactos ambientais. Uma das medidas adotadas é o reaproveitamento dos resíduos da construção civil (RCC), através da produção de agregado reciclado. Os RCCs são materiais de grande heterogeneidade em sua composição, o que, conseqüentemente, afeta as propriedades dos agregados reciclados oriundos destes. A variabilidade dos agregados reciclados causa incertezas sobre seu uso em concretos, pois afeta diretamente o comportamento do concreto tanto no estado fresco quanto endurecido. No entanto, a utilização de agregados reciclados no concreto mostra-se viável, pois é possível obter concretos com agregados reciclados com propriedades mecânicas semelhantes aos de concretos convencionais. Contudo, estudos indicam que a retração do concreto com agregado reciclado é maior do que o concreto com agregado natural, devido a maior porosidade e alta taxa de absorção dos agregados reciclados. A retração é um fenômeno dependente do tempo que causa fissuração no concreto, afetando a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto. É importante para viabilizar o uso dos concretos com agregado reciclado a previsão do seu comportamento ao longo do tempo, através de modelos capazes de estimar sua deformação. A deformação devido a retração por secagem depende de diversos fatores, inclusive aqueles associados ao agregado, no entanto, muitos desses fatores não são considerados nos modelos numéricos de previsão do comportamento dos concretos convencionais. Este estudo avaliou os modelos de previsão da retração da NBR 6118 (2014), Modelo II (1978), Modelo B3 (1995), Modelo B4 (2015), Modelo CEB-FIP (1990), Modelo CEB-FIB (2010), Modelo Gardner (2004), Modelo ACI (1978), Modelo ACI (1992), Eurocode 2 (2008) desenvolvidos para concreto com agregado natural, na qual através de um estudo paramétrico e análise estatística analisou-se se os mesmos eram capazes de prever a retração do concreto com agregado reciclado. Os valores teóricos obtidos com os modelos foram comparados com os resultados experimentais do concreto com agregado miúdo e graúdo reciclado verificando que os modelos não são adequados para descrever o comportamento à retração deste tipo de concreto. Diante disso, desenvolveu-se novas propostas de ajuste para prever a retração do concreto com agregado miúdo reciclado e outra para concretos com agregado graúdo reciclado, bem como uma nova formulação para os modelos da NBR 6118 (2014), Modelo II (1978), Modelo CEB-FIB (2010), Eurocode 2 (2008), sendo validados com dados experimentais. Os resultados mostram que conhecido o valor da retração experimental até 90 dias do concreto convencional é possível estimar a retração por secagem do concreto com agregado reciclado para os modelos indicados utilizando o coeficiente de correção proposto  $K_c$ . A nova proposta para os modelos CEB-FIP (1990), CEB-FIB (2010), NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2008) apresenta comportamento que é esperado para as curvas teóricas através de um coeficiente  $K_r$  que utiliza valores da retração do concreto com agregado graúdo reciclado.

Palavras-chave: Agregado Reciclado de Concreto. Concreto com Agregado Reciclado. Retração por Secagem. Modelos Matemáticos.

## ABSTRACT

The construction industry is considered a major cause of environmental degradation, thus, the sector has turned to sustainable development in order to reduce environmental impacts. One of the measures adopted is the reuse of construction waste, through the production of recycled aggregate. The construction waste are materials of great heterogeneity in their composition, which, consequently, affects the properties of the recycled aggregates derived from them. The variability of recycled aggregates causes uncertainties about their use in concrete, since it directly affects the behavior of concrete in both fresh and hardened states. However, the use of recycled aggregates in concrete is feasible, since it is possible to obtain concrete with recycled aggregates with mechanical properties similar to those of conventional concrete. Nevertheless, studies indicate that the shrinkage of concrete with recycled aggregate is higher than that of concrete with natural aggregate, due to the higher porosity and high absorption rate of recycled aggregates. Shrinkage is a time-dependent phenomenon that causes cracking in concrete, affecting the durability and service life of concrete structures. To enable the use of concrete with recycled aggregate, it is important to predict its behavior over time, through models capable of estimating its deformation. The deformation due to drying shrinkage depends on several factors, including those associated with the aggregate; but in spite of that, many of these factors are not considered in the numerical models that predict the behavior of conventional concrete. This study evaluated the shrinkage prediction models of NBR 6118 (2014), Model II (1978), Model B3 (1995), Model B4 (2015), CEB-FIP Model (1990), CEB-FIB Model (2010), Gardner Model (2004), ACI Model (1978), ACI Model (1992), Eurocode 2 (2008) developed for concrete with natural aggregate, in which through a parametric study and statistical analysis it was analyzed if they were able to predict the shrinkage of concrete with recycled aggregate. The theoretical values obtained with the models were compared with the experimental results of concrete with recycled coarse and fine aggregate, verifying that the models are not adequate to describe the shrinkage behavior of this type of concrete. Therefore, new adjustment proposals were developed to predict the shrinkage of concrete with recycled coarse aggregate and another for concrete with recycled coarse aggregate, as well as a new formulation for the models of NBR 6118 (2014), Model II (1978), CEB-FIB Model (2010), Eurocode 2 (2008), being validated with experimental data. The results show that knowing the value of the experimental shrinkage up to 90 days of conventional concrete it is possible to estimate the shrinkage by drying of concrete with recycled aggregate for the indicated models using the proposed correction coefficient  $K_c$ . The new proposal for the models CEB-FIP (1990), CEB-FIB (2010), NBR 6118 (2014) and Eurocode 2 (2008) presents behavior that is expected for the theoretical curves through a  $K_r$  coefficient that uses values of the shrinkage of concrete with recycled coarse aggregate.

**Keywords:** Recycled Aggregate, Concrete with Recycled Aggregate, Shrinkage by Drying, Mathematical Models.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação da produção total de agregado e produção de agregado reciclado de alguns países europeus.....	5
Figura 2 – Imagens geradas pelo microscópio eletrônico: .....	26
Figura 3 – Classificação do agregado graúdo.....	27
Figura 4 - Tensões hidrostáticas em meniscos capilares do concreto. ....	43
Figura 5 – Formação de meniscos entre partículas na superfície devido à evaporação. ....	44
Figura 6 - Representação do líquido entre duas partículas esféricas na superfície. .	44
Figura 7 - Representação da pressão de disjuntora.....	45
Figura 8 - Presença de água adsorvida entre cristais de C-S-H. ....	46
Figura 9 - Ligação sólido-sólido entre cristais de C-S-H. ....	46
Figura 10 - Pressão de desligamento e Força de Van Der Waals.....	47
Figura 11 - Representação da contração <i>Le Chatelier</i> .....	52
Figura 12 - Princípio da retração autógena e química.....	53
Figura 13 - Reversibilidade da retração por secagem.....	57
Figura 14 - Efeitos da retração do concreto. ....	63
Figura 15 – Proporção de trabalhos desenvolvidos com agregado reciclado miúdo e agregado reciclado graúdo.....	75
Figura 16 – Proporção de trabalhos por teor de substituição de agregado .....	75
Figura 17 – Proporção de trabalhos por teor de substituição de agregado graúdo reciclado.....	76
Figura 18 – Variação da retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ): (a) Concreto de resistência normal (40MPa) e 50%AR; (b) Concreto de alta resistência (80MPa) e 100%AR.....	79
Figura 19 – Método de mistura em duas etapas. ....	86

Figura 20 - Fluxograma da caracterização dos agregados graúdos. ....	121
Figura 21 – Resíduo de Construção e Demolição.....	123
Figura 22 – Processo beneficiamento dos resíduos.....	123
Figura 23 – Britador.....	124
Figura 24 – Separação dos agregados em diferentes granulometrias. ....	124
Figura 25 – Pesagem dos Agregados Graúdos Reciclados.....	126
Figura 26 – Equipamento <i>Los Angeles</i> . ....	128
Figura 27 – Esferas de ferro utilizadas no ensaio. ....	128
Figura 28 – Amostra de agregado no forno.....	129
Figura 29 – Amostra imersa em água.                      Figura 30 – Retirada da argamassa. .....	130
Figura 31 - Fluxograma da caracterização do concreto. ....	131
Figura 32 – Método de mistura com aditivo superplastificante.....	135
Figura 33 – Ensaio de espalhamento na mesa de Graff. ....	136
Figura 34 – Ensaio de absorção por capilaridade. ....	137
Figura 35 – Ensaio de resistência à compressão.....	139
Figura 36 – Ensaio de módulo de elasticidade.....	140
Figura 37 - Colocação dos pinos e obtenção da distância G. ....	141
Figura 38 - Corpo de prova desmoldado e realização da 1º leitura.....	141
Figura 39 - Disposição dos corpos de prova na sala climatizada.....	142
Figura 40 – Medição do comprimento dos corpos de prova.....	143
Figura 41 - Calibração do relógio de referência. ....	143
Figura 42 - Pesagem do corpo de prova. ....	144
Figura 43 - Fluxograma para procedimento numérico.....	146
Figura 44- Fluxograma com os parâmetros fixos e variáveis. ....	151

Figura 45 – Curva Granulométrica dos Agregados Miúdos.....	162
Figura 46 – Curva Granulométrica dos Agregados Graúdos. ....	164
Figura 47 – Correlação entre os valores de massa específica aparente e absorção. .....	165
Figura 48 – Classificação do agregado baseada na relação entre absorção e.....	167
Figura 49 – Curva Granulométrica da Cinza Volante. ....	169
Figura 50 – Absorção por capilaridade (C) para as misturas com $a/c=0,65$ .....	170
Figura 51 – Absorção por capilaridade (C) para as misturas com $a/c=0,55$ .....	172
Figura 52 – Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica para as misturas com $a/c=0,55$ . ....	175
Figura 53 – Resultados da resistência à compressão ( $a/c=0,65$ ).....	176
Figura 54 – Resultados da resistência à compressão ( $a/c=0,55$ ).....	178
Figura 55 – Resultados de módulo de elasticidade ( $a/c=0,65$ ).....	179
Figura 56 – Resultados de módulo de elasticidade ( $a/c=0,55$ ).....	180
Figura 57 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) ao longo do tempo ( $a/c=0,65$ ). ....	182
Figura 58 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) aos 95 dias ( $a/c=0,65$ ).....	182
Figura 59 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) ao longo do tempo ( $a/c=0,55$ ). ....	184
Figura 60 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) aos 95 dias ( $a/c=0,55$ ).....	184
Figura 61 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) aos 95 dias concretos com ARC. ....	185
Figura 62 – Relação entre módulo de elasticidade (GPa) e retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) aos 95 dias dos concretos $a/c=0,55$ . ....	186
Figura 63 – Relação entre módulo de elasticidade (GPa) e retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) dados de Amario (2019).....	186
Figura 64 – Influência do teor de agregado reciclado sobre a retração relativa do concreto .....	187

Figura 65 - Retração ao longo do tempo para os modelos: (a)ACI e (b)NBR 6118 e Eurodode 2.....	188
Figura 66 – Variação (%) dos valores de retração obtidos aos 90 dias de cada modelo. ....	194
Figura 67 – Valores do coeficiente de erro M (%) para os modelos de.....	208
Figura 68 – Coeficiente de desvio D (%) para os modelos de previsão com C30 e C60. ....	209
Figura 69 – Relação valores teóricos e dados experimentais C30.....	210
Figura 70 – Relação valores teóricos e dados experimentais C60.....	211
Figura 71 – Relação valores teóricos corrigidos com proposta de Seara-Paz <i>et al.</i> (2016) e dados experimentais C30. ....	213
Figura 72 – Relação valores teóricos corrigidos com proposta de Seara-Paz <i>et al.</i> (2016) e dados experimentais C60. ....	214
Figura 73 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo.....	215
Figura 74 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo.....	216
Figura 75 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo.....	216
Figura 76 – Variação típica da razão retração teórica/retração experimental .....	219
Figura 77 – Evolução do tempo $K_2$ ao longo do tempo.....	220
Figura 78 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos C3025 e C3050 após a correção. ....	221
Figura 79 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos C6025 e C6050 após a correção. ....	222
Figura 80 – Valores do coeficiente de erro M (%) para os modelos de previsão. ....	226
Figura 81 – Coeficiente de desvio D (%) para os modelos de previsão. ....	226
Figura 82 – Relação valores teóricos médios e dados experimentais.....	227

Figura 83 – Relação valores teóricos corrigidos com proposta de Seara-Paz <i>et al.</i> (2016). e dados experimentais.....	229
Figura 84 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo .....	230
Figura 85 – Variação típica da razão retração teórica/ retração experimental .....	232
Figura 86 – Evolução do tempo $K_2$ ao longo do tempo.....	233
Figura 87 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e 40RCD55 após a correção.....	234
Figura 88 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo CEB-FIP (1990). .....	240
Figura 89 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo CEB-FIB (2010). .....	240
Figura 90 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo Modelo II (1978). .....	241
Figura 91 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo NBR 6118 (2014).....	241
Figura 92 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo Eurocode 2 (2008).....	242
Figura 93 – Retração por secagem de concretos com agregado graúdo reciclado (90 dias). .....	243

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros das Normas e Recomendações.....	17
Tabela 2 - Parâmetros das Normas e Recomendações.....	18
Tabela 3 – Massa específica do agregado de acordo com a literatura. ....	20
Tabela 4 – Valores de absorção (%) dos agregados reciclados e naturais.....	23
Tabela 5 – Abrasão LA (%perda de massa) de diferentes autores. ....	29
Tabela 6 - Massa específica do concreto (kg/dm <sup>3</sup> ). ....	31
Tabela 7 - Métodos para compensar a perda de água da mistura. ....	32
Tabela 8 - Módulo de Elasticidade (MPa). ....	38
Tabela 9 - Condições do ensaio de retração.....	61
Tabela 10 - Pesquisas com os teores de substituição dos agregados miúdos reciclados.....	73
Tabela 11 - Pesquisas com os teores de substituição dos agregados graúdos reciclados.....	74
Tabela 12 - Valores característicos da deformação específica de retração $\epsilon_{cs} t_{\infty}, t_0$ .....	90
Tabela 13– Valores usuais para determinação do coeficiente de retração $\epsilon_{1s}$ .....	92
Tabela 14– Parâmetros dependentes do agregado. ....	100
Tabela 15 – Parâmetros da retração por secagem dependentes do tipo de cimento: cimento de endurecimento regular (R), cimento de endurecimento rápido (RS) e cimento de endurecimento lento (SL). ....	101
Tabela 16 – Parâmetros da retração autógena dependentes do tipo de cimento: cimento de endurecimento regular (R), cimento de endurecimento rápido (RS) e cimento de endurecimento lento (SL). ....	102
Tabela 17 – Fatores de escala dos parâmetros dependentes da classe .....	103

Tabela 18 – Parâmetros da retração por secagem para o cimento de endurecimento regular (R), cimento de endurecimento rápido (RS) e cimento de endurecimento lento (SL).....	104
Tabela 19 – Parâmetros da retração autógena para o cimento de endurecimento regular (R), cimento de endurecimento rápido (RS) e cimento de endurecimento lento (SL).....	104
Tabela 20 – Fatores que correlacionam o tipo de cimento.....	107
Tabela 21 – Coeficiente de idade para determinação da retração. ....	110
Tabela 22– Coeficientes para a espessura média do membro. ....	110
Tabela 23 - Fatores de correção da retração para cura úmida. ....	113
Tabela 24 – Fator de correção de retração relacionada a espessura da peça. ....	114
Tabela 25 – Valores de $kh$ . ....	116
Tabela 26 – Coeficientes de acordo com o tipo de cimento.....	117
Tabela 27 - Misturas e nomenclatura utilizada.....	133
Tabela 28 – Traço utilizado na confecção das misturas.....	134
Tabela 29 - Consumo das misturas para 1 m <sup>3</sup> de concreto.....	134
Tabela 30 - Dimensões e quantidades dos corpos de prova. ....	135
Tabela 31 – Misturas e tempo de leitura da massa saturada ( $msat$ ). ....	137
Tabela 32 – Parâmetros de entrada dos modelos para a previsão da retração. ....	148
Tabela 33 – Traço padrão para análise paramétrica.....	150
Tabela 34 – Parâmetros com os valores de entrada adotados para cada modelo.	153
Tabela 35 - Composição das misturas de concreto com agregado miúdo reciclado. .....	158
Tabela 36 - Propriedades do concreto com agregado miúdo reciclado. ....	158

Tabela 37 - Composição das misturas de concreto com agregado graúdo reciclado. .....	158
Tabela 38 - Propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado. ....	159
Tabela 39 – Resultado da Caracterização dos Agregados Miúdos. ....	162
Tabela 40 – Resultado da Caracterização dos Agregados Graúdos. ....	163
Tabela 41 – Resultado Índice de Forma e Abrasão dos Agregados Graúdos. ....	166
Tabela 42 – Requisitos das propriedades físicas para as classes propostas. ....	166
Tabela 43 – Resultado de absorção e massa específica brita 1. ....	168
Tabela 44 – Resultado do Espalhamento (Método de Graff). ....	170
Tabela 45 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica. ....	173
Tabela 46 – Relação teórico/experimental do módulo de elasticidade. ....	181
Tabela 47 – Parâmetro de maior influência nos modelos estudados. ....	192
Tabela 48 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros de projeto. ....	196
Tabela 49 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros da mistura. ....	197
Tabela 50 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros dos materiais. ....	200
Tabela 51 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros geométricos. ....	201
Tabela 52 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros de cura. ....	203
Tabela 53 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros do concreto. ....	204
Tabela 54 – Quadro resumo dos parâmetros de influência dos modelos. ....	205

Tabela 55 - Coeficiente de Variação (%) para os modelos de previsão dos concretos. .....	211
Tabela 56 - Coeficiente de Variação (%) para os modelos de previsão dos concretos corrigidos com proposta de Seara-Paz <i>et al.</i> (2016). ....	214
Tabela 57 - Relação da retração teórica /retração experimental para concreto convencional. ....	221
Tabela 58 – Valores do coeficiente de Erro (%) para os modelos de.....	223
Tabela 59 – Valores do coeficiente de Desvio (%) para os modelos de .....	223
Tabela 60 – Valores do coeficiente de Erro (%) para os modelos.....	224
Tabela 61 – Valores do coeficiente de Desvio (%) para os modelos .....	224
Tabela 62 – Resultados dos modelos de previsão dos concretos corrigidos. ....	225
Tabela 63 - Coeficiente de Variação (%) para os modelos de previsão dos concretos. .....	228
Tabela 64 - Coeficiente de Variação (%) para os modelos de previsão dos concretos corrigidos com proposta de Seara-Paz <i>et al.</i> (2016). ....	229
Tabela 65 - Relação da retração teórica /retração experimental para concreto convencional. ....	233
Tabela 66 – Valores do coeficiente de Erro (%) para os modelos.....	235
Tabela 67 – Valores do coeficiente de Desvio (%) para os modelos .....	235
Tabela 68 – Valores do coeficiente de Erro (%) para os modelos.....	236
Tabela 69 – Valores do coeficiente de Desvio (%) para os modelos .....	236
Tabela 70 – Resultados dos modelos de previsão dos concretos corrigidos. ....	237
Tabela 71 – Intervalo de variação dos coeficientes $K_r$ . ....	238
Tabela 72 – Valores do coeficiente $K_r$ . ....	239

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RCC	Resíduo da Construção Civil
AR	Agregado Reciclado
UEPG	<i>Union Européenne des Producteurs de Granulats</i>
ACR	Agregado de Resíduo de Concreto
ARC	Agregado Graúdo Reciclado
ARM	Agregado de Reciclado Misto
ARCI	Agregado Reciclado Cimentício
ARCO	Agregado Reciclado de Concreto
CRU	<i>Commissie voor Uitvoering van Research</i>
RILEM	<i>The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures</i>
LA	<i>Los Angeles</i>
AA	Teor de Argamassa Aderida
AMN1	Areia fina quartzosa natural
AMN2	Areia média quartzosa
ACA	Águas Clara Ambiental
SSS	Saturada com Superfície Seca
PP	Fibras de Polipropileno
MEC	Modelo de Empacotamento Compressível
TF	Teor de agregado miúdo
TA	Teor total de agregado
CA	Agregado Graúdo
NFA	Agregado Miúdo Natural
RFA	Agregado Miúdo Reciclado
FA	Agregado Miúdo
AM	Argamassa Aderida

ARCSAM	Agregado Reciclado sem Argamassa Aderida
RGA	Teor de Agregado Graúdo Reciclado
TSMA	Abordagem Mistura em Dois Estágios

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	3
1.3	OBJETIVOS	7
1.3.1	Objetivo Geral	7
1.3.2	Objetivos Específicos	7
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	8
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>10</b>
2.1	AGREGADO RECICLADO	10
2.1.1	Normas e Recomendações	12
2.1.2	Propriedades do Agregado Reciclado	19
2.2	CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO	29
2.2.1	Propriedades dos Concretos com Agregado Reciclado	29
2.2.2	Concreto Estrutural com Agregado Reciclado	40
2.3	RETRAÇÃO DO CONCRETO	41
2.3.1	Mecanismos Causadores da Retração	42
2.3.2	Fenômeno da Retração	48
2.3.3	Fatores que influenciam a retração	59
2.3.4	Efeitos da retração no concreto	62
2.3.5	Medidas para mitigar os efeitos da retração	64
2.4	RETRAÇÃO POR SECAGEM DO CONCRETO COM ACR	71
2.4.1	Fatores que influenciam à Retração no Concreto com ARC	72
2.5	MODELOS DE PREVISÃO DA RETRAÇÃO	88
2.5.1	NBR 6118 (2014)	90
2.5.2	Modelo II (1978)	92
2.5.3	Modelo B3 (1995)	94
2.5.4	Modelo B4 (2015)	97

2.5.5	Modelo CEB-FIP (1990).....	105
2.5.6	Modelo CEB-FIB (2010).....	106
2.5.7	Modelo Gardner (2004).....	108
2.5.8	Modelo ACI (1978).....	109
2.5.9	Modelo ACI (1992).....	112
2.5.10	Eurocode 2 (2008) .....	115
2.5.11	Seara-Paz <i>et al.</i> (2016).....	117
2.5.12	Lv <i>et al.</i> (2019).....	119
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>121</b>
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	121
3.1.1	Agregado Reciclado.....	121
3.1.2	Concreto com Agregado Reciclado .....	130
3.1.3	Retração do Concreto.....	140
3.2	PROCEDIMENTO NUMÉRICO.....	145
3.2.1	Implementação dos modelos .....	146
3.2.2	Estudo paramétrico.....	146
3.2.3	Análise estatística .....	157
3.2.4	Propostas modelos de retração .....	160
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>162</b>
4.1	AGREGADOS .....	162
4.1.1	Agregados Miúdos.....	162
4.1.2	Agregados Graúdos.....	163
4.2	CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO .....	169
4.2.1	Caracterização dos materiais.....	169
4.2.2	Caracterização do concreto .....	169
4.2.3	Retração .....	181
4.2.4	Influência do Agregado Reciclado na Retração.....	187

4.3	MODELAGEM TEÓRICA DA RETRAÇÃO.....	188
4.3.1	Estudo Paramétrico .....	188
4.3.2	Modelagem com Agregado Miúdo Reciclado .....	208
4.3.3	Modelagem com Agregado Graúdo Reciclado .....	225
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>245</b>
5.1	AGREGADOS .....	245
5.2	CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO .....	246
5.3	MODELAGEM TEÓRICA DA RETRAÇÃO.....	247
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>252</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A construção civil é responsável pela emissão de gases poluentes, geração de resíduos e degradação de recursos naturais, provocando grande impacto ambiental (BRAGA *et al.*, 2017). A fim de garantir o desenvolvimento sustentável desta indústria, o consumo de recursos deve ser reduzido e a utilização do resíduo da construção civil (RCC) como matéria-prima deve ser aumentada (RODRIGUES *et al.*, 2013). Os resíduos da construção civil são um grande desafio, sobretudo nos países em desenvolvimento, devido a sua quantidade cada vez maior (PUTHUSSERY *et al.*, 2017), causando sérios problemas ambientais, como o esgotamento das áreas de aterro (GOLAFSHANI; BEHNOOD, 2018).

Segundo Tam *et al.* (2018), o crescimento populacional, o desenvolvimento industrial contínuo, a construção de infraestrutura e residências criam enormes quantidades de RCC, gerando, portanto, extrema necessidade de reciclagem desses resíduos. No entanto, a maioria dos países não possui um plano de processamento específico para esses materiais, sendo então, enviados para aterros em vez de serem reutilizados e reciclados em novas construções (SILVA *et al.*, 2014). Porém, com a progressiva depleção de recursos naturais e a crescente conscientização sobre o manejo sustentável de resíduos pelas economias desenvolvidas e emergentes, tem ocorrido o incentivo cada vez maior à reciclagem e reutilização de resíduos de construção e demolição em projetos de engenharia civil (TAM *et al.*, 2018).

O uso dos RCCs como agregado na produção de concreto contribui para redução de descartes desses resíduos, além de diminuir o consumo de matérias-primas naturais, sendo uma alternativa viável e sustentável. Os agregados ocupam cerca de 70 a 80% do volume total de concreto (MANZI *et al.*, 2013; VERIAN *et al.*, 2018), logo a utilização dos agregados reciclados (AR) apresenta-se como uma opção promissora do ponto de vista ambiental. Dos vários tipos de RCC, os resíduos de concreto são os que apresentam maior proporção, pois o concreto é um material produzido em grande escala na indústria da construção (TAM *et al.*, 2015) e de acordo com Pedro *et al.* (2017), os agregados de concreto são o tipo de agregado reciclado com maior potencial de incorporação ao concreto estrutural.

Segundo Silva *et al.* (2016), o uso do agregado reciclado como substituto de agregados naturais na produção de concreto tem sido considerado um dos métodos

mais eficientes para reciclar, e assim, contribuir para uma maior sustentabilidade na construção. Países como a China, Índia, Indonésia, Malásia, Tailândia, Estados do Golfo, Turquia, Rússia, Brasil e o México registraram alguns dos maiores aumentos na demanda por reciclagem de resíduos, à medida que o espaço para aterro se torna escasso e a demanda de agregados continua aumentando (TAM *et al.*, 2018). Desta forma, o uso do agregado de resíduo de concreto (ACR) substituindo o agregado natural para produzir um concreto de agregado reciclado (GENG *et al.*, 2016), tem tido uma crescente relevância nas últimas décadas (WIJAYASUNDARA *et al.*, 2018). Estes ACR são compostos por agregados naturais originais e uma quantidade variável de argamassa, proveniente da pasta de cimento preexistente, aderida ao agregado natural (MAZZUCCO *et al.*, 2018).

Os agregados reciclados possuem propriedades físicas e mecânicas semelhantes às do agregado natural (PUTHUSSERY *et al.*, 2017), no entanto, apresentam grande variabilidade decorrente das diferentes origens do RCC e do processo de beneficiamento (MCGINNIS *et al.*, 2017), exibindo uma estrutura heterogênea (AKÇA *et al.*, 2015). Segundo Miranda e Selmo (2006), a variabilidade dos agregados reciclados de RCC pode estar relacionada principalmente a seus constituintes minerais e distribuição de tamanho de grãos, e esta variação em sua composição é um problema que inibe o uso de agregados reciclados na produção de concreto (CABRAL *et al.*, 2010). Dependendo da fonte dos resíduos, o agregado reciclado pode conter impurezas (madeira, plástico, gesso, asfalto, etc.) que variam amplamente na natureza e proporção, causando efeito adverso no comportamento do concreto no estado fresco e endurecido (MEDINA *et al.*, 2014). Sendo assim, a fonte do agregado reciclado, ou seja, a origem do mesmo, tem grande influência nas propriedades do concreto (PEDRO *et al.*, 2014).

De acordo com Bravo *et al.* (2018), as propriedades do concreto são significativamente afetadas pela incorporação dos agregados reciclados e este efeito é fortemente dependente das propriedades dos ARs de cada fonte específica. Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas buscando analisar as propriedades dos agregados reciclados bem como a sua influência no comportamento do concreto (PEDRO *et al.*, 2017), visto que os ARs afetam diretamente as propriedades do concreto. Segundo Pedro *et al.*, (2014), a resistência do concreto que originou o agregado reciclado tem pouca influência nas propriedades do concreto com AR, e os agregados fabricados em laboratório são equivalentes, em termos mecânicos e de durabilidade, aos obtidos

de pré-fabricados de mesma resistência. No entanto, as propriedades do agregado reciclado variam significativamente, sendo muito importante conhecer o nível ideal de AR que pode ser utilizado em um concreto novo (PAUL *et al.*, 2018).

Puthussery *et al.* (2017) avaliaram o potencial do uso do concreto com agregados reciclados nas construções e concluíram que as propriedades dos agregados reciclados se mostraram satisfatórias para sua utilização nas atividades de construção de estradas e obras de concreto. No entanto, o uso do concreto com agregado reciclado na indústria da construção, em muitos países em desenvolvimento, ainda é limitado, não sendo ainda consideradas e aplicadas, devido à falta de conhecimento, políticas e especificações (PUTHUSSERY *et al.*, 2017; TAM *et al.*, 2018).

Nos países desenvolvidos, o estímulo à utilização dos RCC varia de país para país, e espera-se que a utilização dos agregados reciclados aumente e se torne parte substancial do mercado em um futuro próximo (TAM *et al.*, 2018). Segundo Tam *et al.* (2018), existe uma variação no nível de reciclagem de materiais em vários países no mundo devido as grandes diferenças nas tradições de construção, na legislação sobre aterros e ao nível de percepção e aceitação de construtores quanto ao uso dos agregados reciclados. No entanto, devido ao recente impulso para o fornecimento de materiais sustentáveis, tem ocorrido o aumento do uso de agregados reciclados nos concretos (DODDS *et al.*, 2017).

A Europa tem promovido uma política que viabiliza o uso de agregados reciclados, em busca de reduzir o uso de materiais naturais e o impacto ambiental (PEPE *et al.*, 2014a). Desde 1987, na União Européia existe a UEPG (*Union Européenne des Producteurs de Granulats*), que é responsável por desenvolver os interesses da indústria dos agregados visando a oferta sustentável de agregados, sua competitividade e seu crescimento (TAM *et al.*, 2018). De acordo com Tam *et al.* (2018), na Austrália os agregados reciclados são os resíduos mais usados na produção de concreto. No Reino Unido, a produção de agregados reciclados aumentou gradualmente nos últimos 30 anos e esse material está sendo usado em uma ampla gama de aplicações na construção (TAM *et al.*, 2018).

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O uso de agregados reciclados no concreto em substituição ao agregado natural é uma solução promissora para o problema dos RCC. No entanto, de acordo com

Lotfy e Al-Fayez (2015), os projetistas hesitam em utilizar os agregados reciclados em misturas de concreto armado, limitando sua utilização em aplicações de baixo risco, como calçadas, aterramento e como material granular para pavimentos. A maior parte do seu uso é em construções de menor porte, mas alguns países desenvolvidos já utilizam o material em concreto estrutural, inclusive com a qualidade dos agregados sendo certificada, fornecendo uma garantia consistente do agregado reciclado (TAM *et al.*, 2018).

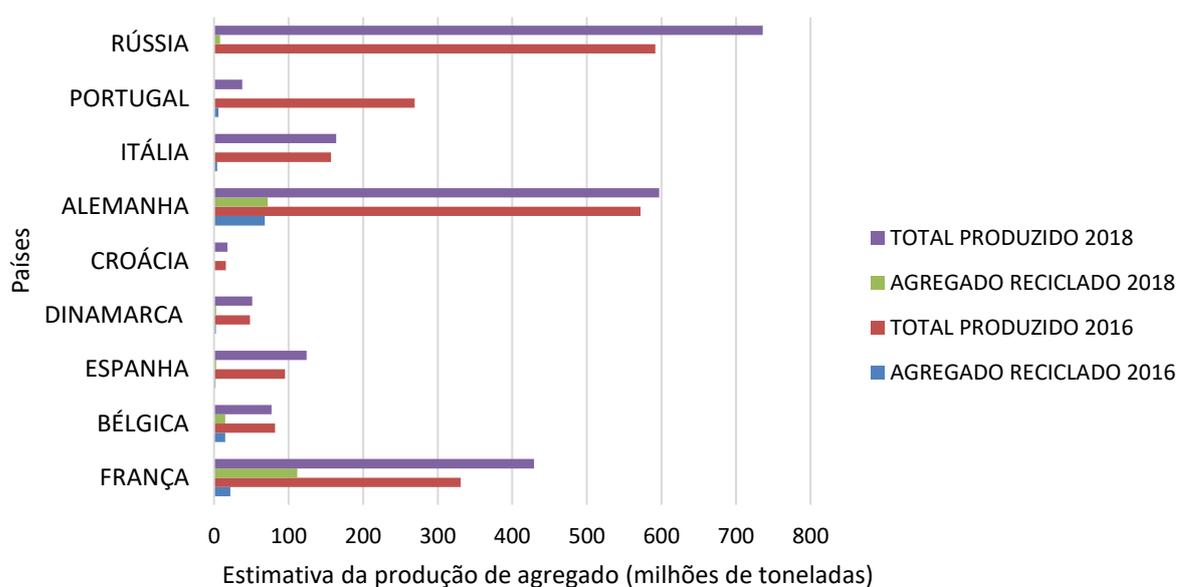
Apesar das muitas vantagens associadas a utilização do agregado reciclado no concreto, atualmente, o concreto com agregado reciclado não é fabricado em escala comercial para substituir o concreto com agregado natural usado em elementos estruturais (WIJAYASUNDARA *et al.*, 2018). Fathifazl *et al.* (2011) afirmam que isso pode ser atribuído à escassez de dados técnicos, especificações, controle e procedimentos que garantam a qualidade do concreto com AR. Desta forma, o uso do agregado reciclado para aplicações estruturais é limitado devido à incerteza em relação ao seu desempenho e o seu uso em concreto estrutural só será considerado uma opção viável para futuros projetos, desde que se obtenha agregados reciclados de uma fonte confiável e consistente (DODDS *et al.*, 2017).

Silva *et al.* (2014) analisaram os fatores que afetam as propriedades físicas, químicas, mecânicas, de permeação e composição de agregados reciclados provenientes da construção e resíduos de demolição destinados à produção de concreto. Apesar da variabilidade dos resultados, os autores propõem uma classificação baseada no desempenho para avaliar a qualidade dos agregados reciclados, afirmando que os mesmos podem ser considerados um agregado, como o natural, se devidamente processado e categorizado. De acordo com TAM *et al.* (2018), os agregados reciclados estão sendo utilizados nas construções, mas ainda é difícil superar as barreiras que impedem seu uso mais amplo, pois a aceitabilidade do agregado reciclado é dificultada pela falta de confiança no produto fabricado a partir do material reciclado.

Observa-se na Figura 1 que em muitos países da Europa, apesar do incentivo à reciclagem através da UEPG, a produção de agregado reciclado ainda é baixa comparado ao agregado total produzido. Existe uma tendência de aumento na produção de agregado, do total de 39 países, segundo dados da UEPG (2018), no ano de 2016 houve uma produção de 3949 milhões de toneladas de agregado, sendo 5,3% de agregado reciclado. No ano de 2018, houve um aumento no total produzido para 4353

milhões de toneladas de agregado, sendo deste total 7,7% do agregado é reciclado e reutilizável (UEPG, 2020).

Figura 1 - Comparação da produção total de agregado e produção de agregado reciclado de alguns países europeus.



FONTE: modificado de UEPG (2018) e UEPG (2020).

Ainda segundo a UEPG (2020), do total produzido em 2018, 49,5% do agregado é proveniente de rocha britada, 39,7% é areia e cascalho, 1,3% de agregados marinhos e 2,3% é de agregados fabricados. Lotfy e Al-Fayez (2015) afirmam que o agregado reciclado de concreto só será considerado efetivamente um substituto do agregado natural, se houver produção industrial com qualidade controlada.

Um concreto que incorpore os agregados reciclados e ainda apresente um bom desempenho requer que os agregados sejam totalmente caracterizados para que seu comportamento dentro do concreto possa ser previsto (RODRIGUES *et al.*, 2013) através de modelos matemáticos. Toledo Filho *et al.* (2013) afirmam que os agregados reciclados só podem ser considerados uma alternativa para os agregados naturais se for possível fornecer concretos com propriedades mecânicas e de durabilidade previsíveis e semelhantes às misturas de concreto comuns com agregados naturais. No entanto, também é necessário que o concreto com agregado reciclado apresente comportamento ao longo do tempo semelhante ao concreto convencional. Segundo Hayles *et al.* (2018), os agregados de concreto reciclado de boa qualidade podem ser

produzidos para aplicações estruturais se suas propriedades forem consideradas adequadamente no projeto de mistura.

Muitos estudos buscam determinar as propriedades dos agregados reciclados comparando-os ao do agregado convencional, nos quais verificam-se sua massa específica e unitária, absorção, granulometria, forma e textura, variando o teor de substituição e analisando como essas propriedades afetam o comportamento do concreto reciclado (SILVA *et al.*, 2014; PADMINI *et al.*, 2009; BAIRAGI *et al.*, 1993; MCGINNIS *et al.*, 2017; OMARY *et al.*, 2016; PEPE *et al.*, 2016). Outros estudos analisam as propriedades de resistência e/ou durabilidade do concreto utilizando agregado reciclado (SIM; PARK, 2011; BRAVO *et al.*, 2015; TAM; TAM, 2007; OLORUNSOGO; PADAYACHEE, 2002; RAHAL, 2007; XIAO *et al.*, 2012; EVANGELISTA; BRITO, 2010; CABRAL *et al.*, 2010; DE BRITO *et al.*, 2016; PEPE *et al.*, 2014; YODA; SHINTANI, 2014; ZAETANG *et al.*, 2016; YAP *et al.*, 2018), ou ainda como o processamento do agregado afeta as propriedades mecânicas do concreto reciclado (PEPE *et al.*, 2014 a) e métodos para melhorar as propriedades dos agregados reciclados (SARAVANAKUMAR *et al.*, 2016; BUI *et al.*, 2018). A maioria das pesquisas são relacionados ao uso do agregado graúdo reciclado, no entanto, quando os resíduos de concreto são processados para obtenção das frações grossas de agregado, uma grande quantidade de agregado de concreto reciclado fino é gerada dependendo da origem do resíduo (ANDRADE, 2020).

Xie *et al.* (2018) avaliaram através de uma revisão de literatura como os agregados de concreto reciclado afetam as propriedades mecânicas do concreto e trabalhos como os de Dodds *et al.* (2017) verificaram o efeito do agregado reciclado na durabilidade do concreto. Alguns estudos como o de Medjigbodo *et al.* (2018) analisaram as propriedades mecânicas, durabilidade e também a retração por secagem, verificando a influência do teor de substituição na retração. No entanto, existe falta de dados generalizados e confiáveis sobre a influência dos agregados reciclados nas propriedades de longo prazo do concreto (MANZI *et al.*, 2013), havendo poucos estudos sobre o comportamento a longo prazo do concreto com agregado reciclado (TAM *et al.*, 2015), sobretudo sobre a retração. Segundo Manzi *et al.* (2013), as propriedades dependentes do tempo, como retração e fluência, combinadas com medições de porosidade e investigações mecânicas são características fundamentais para avaliar o comportamento estrutural do concreto.

As maioria das pesquisas desenvolvidas (MANZI *et al.*, 2013; MEDJIGBODO *et al.*, 2018; LOTFY E AL-FAYEZ, 2015; TAM *et al.*, 2015; TAM; TAM, 2007; PEDRO *et al.*, 2017) buscam analisar a retração do concreto com agregado reciclado em função do tipo de agregado reciclado (miúdo e graúdo), bem como diferentes proporções do mesmo, verificando o efeito do aumento da porcentagem do agregado reciclado na retração, ou mesmo, analisando a retração para diferentes fontes de agregado reciclado e resistência à compressão do concreto de origem (PEDRO *et al.*, 2014; GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA, 2016). No entanto, são necessários mais estudos que relacionem as propriedades dos agregados reciclados à retração, buscando desenvolver modelos capazes de prever o comportamento do concreto com agregado reciclado.

Silva *et al.* (2015a) fizeram uma série de comparações entre a deformação de retração obtida experimentalmente e aquela calculada utilizando os modelos existentes para predição de retração do concreto convencional, e concluíram que a comparação de modelos com dados experimentais é imprecisa pela falta de concordância na seleção de dados apropriados e nos métodos usados na correlação, sendo difícil decidir sobre qual modelo usar para prever a retração. A retração é uma propriedade complexa que depende de diversos fatores, na qual já existem modelos numéricos de previsão do comportamento dos concretos convencionais. Entretanto, não existem modelos que representem adequadamente a retração do concreto com agregado reciclado, devido a variabilidade dos mesmos e aos diversos parâmetros envolvidos. É de suma importância quantificar as deformações causadas pela retração, ao prever o seu comportamento através de modelos numéricos, sendo fundamental para análise estrutural e futuros projetos de concreto com agregado reciclado.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver uma nova proposta de modelo teórico de previsão da retração por secagem do concreto com agregado reciclado.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Estudar os fenômenos relacionados a retração por secagem do concreto com agregado reciclado;
- Analisar dados experimentais da retração por secagem do concreto com agregado reciclado;
- Estudar os modelos teóricos disponíveis na literatura destinados à previsão da retração;
- Comparar os resultados experimentais com os resultados dos modelos teóricos;
- Verificar se os modelos são adequados para previsão da retração por secagem;
- Avaliar a adequação dos modelos existentes para prever a retração de concretos com agregado reciclado;
- Desenvolver estratégias numéricas capaz de descrever o comportamento a retração do concreto com agregado reciclado;
- Validar os resultados das estratégias numéricas a partir de dados experimentais.

#### **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

Este trabalho é organizado em cinco capítulos, cuja descrição é exposta a seguir.

**Capítulo 1:** abrange a introdução do trabalho, destacando alguns aspectos relacionados ao tema nas considerações iniciais, justificativa para o desenvolvimento do assunto, objetivos e organização do texto.

**Capítulo 2:** aborda a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento do trabalho, apresentando algumas normas e recomendações existentes para o uso do agregado reciclado, bem como as principais propriedades do agregado reciclado. Posteriormente, apresenta uma revisão dos principais conceitos relacionados ao concreto com agregado reciclado, abordando suas propriedades e o uso do concreto estrutural com agregado reciclado. Além disso, apresenta os conceitos relacionados a retração, mostrando os mecanismos causadores da retração e distinguindo os diferentes tipos existentes. Nesta seção também é apresentado os fatores que influenciam a retração, a retração no concreto com agregado reciclado, os impactos no concreto devido à

retração e medidas utilizadas para mitigar o seu desenvolvimento. Finalizando a seção, é exposto alguns modelos numéricos existentes utilizados para prever o comportamento a retração do concreto, apresentado suas formulações.

**Capítulo 3:** são apresentados os procedimentos experimentais utilizados para a caracterização dos materiais, definição dos traços, produção e moldagem das misturas e caracterização do concreto. Logo após, está o procedimento experimental utilizado para a retração por secagem. Em seguida é apresentado o procedimento numérico desenvolvido no estudo, abordando o procedimento utilizado para o estudo paramétrico, análise estatística e proposta de modelo para retração.

**Capítulo 4:** expõe os resultados encontrados no procedimento experimental e numérico, bem como a validação dos modelos propostos.

**Capítulo 5:** apresenta as considerações finais relacionados aos resultados encontrados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 AGREGADO RECICLADO

Os agregados afetam a trabalhabilidade, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto (MANZI *et al.*, 2013). Sendo assim, os agregados provenientes de resíduos da construção civil, ou seja, agregados reciclados têm grande influência nas propriedades do concreto, causando efeito adverso no mesmo, e essa influência pode ser avaliada no comportamento do concreto tanto no estado fresco como endurecido (MEDINA *et al.*, 2014; ANDRADE, 2018).

Os resíduos de construção são aqueles provenientes das atividades de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, assim como, os decorrentes da preparação e da escavação de terrenos (CONAMA 307, 2002). A ABNT NBR 15116 (2021) respeita o disposto na Resolução CONAMA nº 307 (2002) para a definição de resíduos da construção civil e a classificação dada aos mesmos. De acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (2002), os resíduos da construção civil podem ser classificados em classes, conforme exposto a seguir:

- Classe A: são aqueles resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados;
- Classe B: são aqueles resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- Classe C: são aqueles resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;
- Classe D: são aqueles resíduos perigosos provenientes do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (2002), o resíduo utilizado como agregado é classificado em classe A. Respeitando essa Resolução, a ABNT NBR 15116 (2021) define agregados reciclados como aqueles materiais granulares que após o beneficiamento de resíduos de construção classe A, apresentam características técnicas para a sua utilização em obras de engenharia.

A etapa de beneficiamento dos resíduos de construção e demolição envolvem os processos de coleta, transporte, separação, britagem, peneiramento e estocagem (AMARIO, 2015; ANDRADE, 2018). Segundo Leite (2001), estudos apontam que o

beneficiamento do RCC é semelhante ao tratamento utilizado nos agregados naturais, inclusive utilizando praticamente os mesmos equipamentos. As propriedades do agregado reciclado podem ser significativamente afetadas pelo seu processo de reciclagem, além da qualidade do concreto de origem e dimensão (PEDRO *et al.*, 2017).

O RCC pode ser classificado de diversas formas, sendo que uma das mais utilizadas é quanto a sua origem, podendo ser classificada em: proveniente de construção; proveniente de demolição; ou de construção e demolição (AMARIO, 2015). O RCC apresenta uma composição variada, sendo um resíduo com grau de heterogeneidade dependente da sua origem (ANDRADE, 2018), este material heterogêneo é composto em grande parte por concretos, argamassas, rochas naturais, cerâmica, madeira, aço, plásticos, gesso, vidro e impurezas (RANGEL, 2015). A composição heterogênea do RCC é um dos fatores que dificultam o seu uso em larga escala nos concretos, pois há uma variabilidade dos mesmos e das suas propriedades (AKÇA *et al.*, 2015; MCGINNIS *et al.*, 2017; RANGEL, 2015). Existe uma necessidade de classificações mais restritivas, no intuito de ampliação da utilização dos resíduos, além de produzir materiais mais homogêneos e de maior qualidade (LEITE, 2001).

A ABNT NBR 15116 (2021) classifica os agregados reciclados em três grupos distintos:

- ARCI (Agregado Reciclado Cimentício) como aquele agregado constituído predominantemente por materiais cimentícios (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.), podendo incluir teores reduzidos de cerâmica vermelha;
- ARCO (Agregado Reciclado de Concreto) como aquele constituído predominantemente por resíduos de concreto;
- ARM (Agregado Reciclado Misto) como aquele agregado constituído por uma mistura de materiais cimentícios (concretos, argamassas, blocos pré-moldados de concreto etc.) e materiais cerâmicos (blocos e telhas cerâmicas etc.).

O comitê RILEM TC 121-DRG (1994) propõe a classificação dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em tipos:

- Tipo I: são os agregados provenientes de resíduos de materiais cerâmicos, como tijolos, telhas e blocos;
- Tipo II: são os agregados provenientes de resíduos de concreto;

- Tipo III: são os agregados provenientes da mistura de pelo menos 80% de agregados naturais com materiais dos outros dois grupos, sendo que a quantidade de material do Tipo I deve ser inferior a 10%.

A ABNT NBR 15116 (2021) traz os requisitos dos agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para a utilização em pavimentação e preparo de concreto. A versão anterior da NBR 15116 não contemplava concretos com função estrutural, mas segundo a ABNT NBR 15116 (2021) o agregado reciclado pode ser utilizado em compósitos ou produtos com função estrutural, como concretos de cimento Portland, artefatos pré-fabricados e argamassas com função estrutural, na qual é indicado unicamente utilizar a subclasse ARCO.

Nos casos de uso do agregado reciclado em concretos com função estrutural, a substituição de agregado natural por agregado reciclado é limitada a 20% da massa de agregados totais e a concretos das classes de agressividade I e II da ABNT NBR 6118 (2014) (ABNT NBR 15116, 2021). Segundo a ABNT NBR 15116 (2021), nos demais casos, para usos sem função estrutural pode ser utilizado ARCO, ARCI e ARM em teores de substituição de até 100% da massa de agregados naturais. Já a RILEM TC 121-DRG (1994) não limita o teor de agregados reciclados que podem ser utilizados em concretos com resistência à compressão de até 60 MPa, desde que o agregado seja proveniente de resíduos de concreto.

### **2.1.1 Normas e Recomendações**

Devido a variabilidade do agregado reciclado e de suas propriedades, o mesmo ainda não é utilizado em larga escala em concretos, sobretudo, estrutural. De acordo com Pepe (2014b), devido à grande variabilidade nas características de resíduos de construção e demolição, as prescrições propostas por normas e recomendações são fundamentais para viabilizar a reutilização desse resíduo na forma de agregados de concreto. Atualmente, normas e recomendações já existem, ou vem sendo desenvolvidas com o intuito de viabilizar a aplicação do agregado reciclado em concretos. A seguir são apresentadas algumas destas normas e recomendações.

- a) Alemã (DIN 4226-100:2002 e DAfStb, 1998)

A DIN 4226-100 (2002) - *Aggregates for mortar and concrete – recycled aggregates*, estabelece os requisitos dos agregados, na qual distingue os agregados reciclados em quatro tipos referentes a composição do material (GONÇALVES, 2007). Os

tipos 1 e 2 são provenientes de demolição, com composição de concreto mais agregado natural igual ou maior que 90%, já o tipo 3 é constituído por mais de 80% de alvenaria e o tipo 4 é composto por todos materiais de construção (GONÇALVES, 2007). O uso do agregado reciclado para confecção de concreto estrutural é delimitado pela DAfStb:1998 (*German Committee for Reinforced Concrete – Concrete with recycled aggregates*), esta complementa à norma DIN 4226-100 apresentando especificações ao agregado para serem utilizados no concreto estrutural e requisitos mínimos de qualidade para os ARCO (GONÇALVES, 2007). Esta norma também especifica o percentual de substituição do agregado reciclado, a massa específica e a absorção, além do desempenho mecânico do concreto através de valores de resistência máxima limitando as classes do concreto.

b) Americana (ACI E-701, 2007)

A norma americana ACI E-701 (2007) classifica os agregados, retratando os tipos de agregados reciclados normalmente usados para confecção de concreto. Além disso, relata as propriedades do agregado e os métodos de teste utilizados para caracterizá-los estabelecendo valores geralmente utilizado para o uso do mesmo no concreto. A norma possui um capítulo específico para o agregado reciclado, na qual trata sobre as propriedades dos agregados reciclados: granulometria e condição da superfície do agregado reciclado, massa específica, absorção e durabilidade.

c) Australiana (Recomendação – CCAA, 2008)

A recomendação Australiana CCAA (2008) é um relatório que tem o objetivo de apresentar uma revisão do agregado reciclado com a classificação em subproduto fabricado, reciclado e reutilizado, a respeito de suas características físicas e mecânicas, os benefícios e limitações da sua utilização na confecção de concreto e na construção de estradas.

d) Belga (Recomendação – 1990)

Segundo Gonçalves (2007), na Bélgica existe uma recomendação dividida em três partes, a primeira especifica o agregado reciclado, a segunda refere-se à aplicação do mesmo e a terceira é relacionado aos coeficientes característicos do agregado. O agregado é dividido em dois tipos, GBSB-I e GBSB-II, o tipo I são os agregados

compostos em sua maioria por alvenaria, já o tipo II é predominantemente constituído por concreto, sendo essa especificação para agregado graúdo, visto que o agregado miúdo é excluída dessa recomendação (GONÇALVES, 2007).

e) Brasileiras

No ano de 2004 foram desenvolvidas no Brasil normas específicas para utilização de resíduos da construção civil, sendo a ABNT NBR 15115 (2004) - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos, e a ABNT NBR 15116 (2004) - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos, esta última sendo atualizada para ABNT NBR 15116 (2021) - Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: Requisitos e métodos de ensaios.

A ABNT NBR 15115 (2004) estabelece os critérios para o uso de agregado reciclado de resíduos de construção civil para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, em obras de pavimentação. A ABNT NBR 15116 (2021) tem como objetivo estabelecer os requisitos para o uso de agregado proveniente de resíduos da construção civil, especificando a produção e recepção dos agregados reciclados (miúdos e graúdos), obtidos a partir do beneficiamento de resíduos, incluindo misturas de agregados naturais e reciclados, para argamassas e concretos de cimento Portland. Esta norma também estabelece os métodos de ensaios para verificação dos requisitos estabelecidos para os agregados reciclados, bem como apresenta diretrizes para o uso desse material.

f) Britânica (BS 8500-2, 2006)

Segundo Gonçalves (2007) a norma Britânica BS 8500-2 (2006), *Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 2: Specification for constituent materials and concrete*, foi desenvolvida para ser executada no próprio País, por isso não são apropriadas para outros lugares com clima quente. A norma estabelece requisitos para o agregado e a limitação de porcentagem para uso, na qual não deve ser empregado em fundações e pavimentos (AMARIO, 2015).

g) Dinamarquesa (ADC, 1995)

Na Dinamarca a utilização de agregado reciclado para concreto é estabelecida pela *Danish Concrete Association - Recommendation for the use of recycled aggregates for concrete in passive environmental class*. Esta recomendação divide o agregado reciclado em três classes, o GP1 testado é o agregado constituídos por concreto, o GP1 não testado é o agregado composto de concreto diferenciado no tamanho do da GP1 testado, e o GP2 é o agregado reciclado misto (GONÇALVES, 2007).

h) Espanhola (RILEM, 2004)

A presente recomendação é um projeto de regulamentação do Ministério do Meio Ambiente da Espanha publicado por Vázquez *et al.* (2004), cujo objetivo é estabelecer certas limitações para o uso de agregado reciclado na confecção de concreto para uso estrutural. Esta recomendação visa garantir que as propriedades do concreto reciclado não difiram significativamente do concreto convencional. A mesma restringe a porcentagem de agregado reciclado utilizado nos concretos e exigem especificações em termos de qualidade e uniformidade do agregado.

i) Holandesa (CRU, 1984)

O centro de investigação holandesa CRU (1984) - *Commissie voor Uitvoering van Research*, vem desenvolvendo especificações para a utilização do agregado reciclado. A norma estabelece dois tipos de agregados reciclados, os provenientes de concreto e o de alvenaria/misto. Para realizar a classificação dos agregados, a norma prescreve que seja analisado as amostras das partículas retidas na peneira de 8 mm, tornando-a como amostras referência deste resíduo (GONÇALVES, 2007).

j) Hong Kong (WBTC nº.12, 2002)

A diretriz produzida pelo Departamento da Construção Civil de Hong Kong, WBTC nº.12 (2002), especifica o uso de agregado reciclado para confecção de concreto e na utilização de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Esta norma é dividida em duas seções, considerando a porcentagem de substituição e as respectivas aplicações.

k) RILEM TC 121-DRG (1994)

O comitê RILEM (1994), *The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures*, é uma associação técnica que desenvolve as recomendações para as propriedades de materiais e desempenho de estruturas, composto por especialistas de diferentes países. Em 1994 foram definidas especificações para agregado reciclado com granulometria maior que 4 mm, pois a areia reciclada não foi recomendada. O mesmo permite a substituição total do agregado por agregado reciclado, mas apenas para o tipo II, ou seja, agregado reciclado de concreto (ARCO).

l) Suíça (SIA 162/4, 2006)

Na Suíça, a utilização de agregados reciclados na confecção de concreto é regulada em conjunto com a norma SIA 162/4 (1994), *Béton de recyclage*. A norma estabelece os requisitos dos agregados, assim como as suas condições de aplicação, diferenciando dois tipos de concretos com agregado reciclados, conforme o grau de exigências das suas aplicações (GONÇALVES, 2007).

#### 2.1.1.1 Parâmetros Estabelecidos nas Normas e Recomendações

Em síntese as normas e recomendações são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, bem como alguns parâmetros estabelecidos nas mesmas com relação ao tipo de agregado reciclado, massa específica, teor de substituição, aplicação (estrutural ou não), absorção de água do agregado e resistência à compressão do concreto.

Tabela 1 - Parâmetros das Normas e Recomendações.

Normas e Recomendações							
Especificação	Classificação	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de substituição		Aplicação	Absorção de água (%)	Resistência máxima
			Graúdo	Miúdo			
Alemã (DAfStb:1998)	ARCO	2000	25%	-	Estrutural	10	30 MPa
	ARCO	2000	35%	-	Estrutural	10	25 MPa
Americana (ACI E-701:2007)	ARCO	-	100%	20%	Não específica	2 a 6	Não específica
Australiana (CCAA:2008)	ARCO	2240 a 2320	30%	-	Estrutural	6	40 MPa
	ARCO	2240 a 2321	100%	-	Não estrutural	8	25 MPa
Belga	ARM (GBSB-I)	1600	Não específica	Não recomenda	Não específica	18	20 MPa
	ARC (GBSB-II)	2100	Não específica	Não recomenda	Não específica	9	30 MPa
Brasileira	ARCI, ARM, ARCO	2000	100%	-	Não estrutural	< 12	Não específica
	ARCO	2000	20%	-	Estrutural	< 7	Não específica
Britânica (BS 8500-2:2006)	ARCO	Não específica	20%	-	Estrutural	-	20 a 40 MPa
Dinamarquesa (ADC:1995)	ARCO(GP1 testado)	2200	100%	20%	Estrutural	-	40 MPa
	ARCO (GP1 não testado)	2200	100%	20%	Estrutural	-	40 MPa
	ARM (GP2)	1800	100%	20%	Estrutural	-	20 MPa

FONTE: Autora (2022).

Tabela 2 - Parâmetros das Normas e Recomendações.

Normas e Recomendações							
Especificação	Classificação	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de substituição		Aplicação	Absorção de água (%)	Resistência máxima
			Graúdo	Miúdo			
Espanhola (RILEM:2004)	ARCO	2000	20%	Não recomenda	Estrutural	7	Não específica
Holandesa (C.R.U:1984)	ARCO	2100	20%	-	Estrutural	Não específica	40 MPa
	ARM	2000	20%	-	Estrutural	Não específica	20 MPa
Hong Kong (HKBD:2004)	ARCO	2000	20%	Não recomenda	Uso no geral	10	25 a 35 MPa
	ARCO	2000	100%	Não recomenda	Não estrutural	10	20 MPa
RILEM (1994) SUÍÇA (SIA 162/4:2006)	ARCO	2000	100%	Não recomenda	Estrutural	10	60 MPa
SUÍÇA (SIA 162/4:2006)	ARCO	Não específica	100%	20%	Estrutural	Não específica	30 MPa
	ARM	Não específica	100%	100%	Não estrutural	Não específica	Não específica

FONTE: Autora (2022).

## 2.1.2 Propriedades do Agregado Reciclado

Os agregados reciclados são compostos de agregados naturais e uma parcela de argamassa aderida, na qual as propriedades dos agregados reciclados dependem da qualidade e da quantidade dessa argamassa aderida (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a), pois a argamassa aderida afeta as propriedades do ACR a um nível significativo (SARAVANAKUMAR *et al.*, 2016; PEPE *et al.*, 2016).

Os agregados possuem grande influência no comportamento à retração do concreto, devendo, assim como ocorre com o agregado natural, verificar a qualidade dos agregados reciclados antes de sua utilização, sendo fundamental conhecer propriedades como absorção, abrasão, massa específica (RAO *et al.*, 2007), entre outras. A origem do agregado reciclado tem influência direta nas propriedades do agregado reciclado, e correlações como absorção e massa específica permitem indicar a qualidade dos agregados reciclados (ANDRADE *et al.*, 2020).

A utilização do agregado reciclado no concreto depende da avaliação de suas propriedades, no intuito de verificar o comportamento desses materiais na estrutura de concreto (LEITE, 2001). As características dos agregados que são mais relevantes nas propriedades do concreto são: massa específica, composição ou distribuição granulométrica, forma e textura, resistência à compressão, módulo de elasticidade, porosidade e absorção de água (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

### 2.1.2.1 Massa específica e Massa unitária

Segundo Amario (2015), a massa específica e a massa unitária são importantes para a dosagem do concreto, visto que existe diferença nos valores obtidos com os agregados naturais e os reciclados, sendo necessário realizar uma compensação de material a ser usado na confecção do concreto quando se utiliza, como base para determinação do traço, a massa de concreto convencional.

Os agregados provenientes dos resíduos de construção e demolição são compostos por materiais mais porosos que os naturais (POON *et al.*, 2002; PEPE *et al.*, 2014a), desta forma, apresentam, geralmente, tanto massa específica,

quanto unitária menor que os agregados naturais (AMARIO, 2015; RANGEL, 2015). Bairagi *et al.* (1993) e Medjigbodo *et al.* (2018) afirmam que os agregados reciclados possuem menor massa específica que os naturais e estudos experimentais, como o de Carrijo (2005), confirmam que a massa específica dos agregados graúdos reciclados é menor.

Na pesquisa realizada por Cabral *et. al* (2010), os agregados miúdos reciclados apresentaram menores valores de massa específica que os naturais. De acordo com o estudo realizado por Lovato (2007) a massa específica para o agregado miúdo reciclado apresentou valores de 2,40 kg/dm<sup>3</sup> e 2,44 kg/dm<sup>3</sup>, para o agregado miúdo natural o valor foi de 2,62 kg/dm<sup>3</sup>, já o agregado graúdo reciclado os valores foram na faixa de 2,40 kg/dm<sup>3</sup> a 2,58 kg/dm<sup>3</sup> e 2,85 kg/dm<sup>3</sup> para agregado graúdo natural, ou seja, tanto o agregado graúdo quanto miúdo reciclado apresentaram valores de massa específica inferiores aos naturais. Verian *et al.* (2018) também afirmam que a massa específica do ACR é geralmente menor que a do agregado natural.

A Tabela 3 apresenta alguns valores de massa específica do agregado reciclado comparado ao natural, confirmando a tendência de menor massa específica para o agregado miúdo reciclado.

Tabela 3 – Massa específica do agregado de acordo com a literatura.

Autores	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	
	Agregado Reciclado	Agregado Natural
Manzi <i>et al.</i> (2013)	2,10	2,54
Medjigbodo <i>et al.</i> (2018)	2,32 - 2,34	2,73
Seara-Paz <i>et al.</i> (2016)	2,57	2,61
Lofy e Al-Fayez (2015)	2,05 - 2,71	2,17 - 2,79
Tam <i>et al.</i> (2015)	2,52 - 2,64	2,70 - 2,72
Fathifazi <i>et al.</i> (2011)	2,31 - 2,64	2,70 - 2,79
Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016)	2,30 - 2,47	2,61 - 2,68
Pedro <i>et al.</i> (2017)	2,30 - 2,40	2,60 - 2,70
Liu <i>et al.</i> (2011)	2,41 - 2,43	2,79
Kurda <i>et al.</i> (2017)	2,39	2,62
Yehi e Abdelfatah (2016)	2,35 - 2,47	2,50 - 2,60
Verian <i>et al.</i> (2013)	2,30 - 2,33	2,62 - 2,69
Amer <i>et al.</i> (2016)	2,38	2,63

FONTE: Autora (2022).

De acordo com a *American Concrete Pavement Association* (2009), a menor massa específica do agregado reciclado comparado ao natural é devido a presença da argamassa aderida ao agregado natural. Desta forma, a massa específica do ACR depende principalmente das proporções relativas de argamassa aderida (ACPA, 2009), quanto maior o teor de argamassa aderida, menor a massa específica do agregado reciclado.

A massa unitária dos agregados reciclados também apresenta menor valor comparado ao agregado natural, isto ocorre devido a menor massa específica do agregado reciclado, a alta porosidade e a forma mais irregular das partículas, que aumentam o vazio entre os grãos (ANDRADE, 2018). Os valores de massa específica e massa unitária disponíveis na literatura são muito variáveis, isto é decorrente do tipo de britador utilizado, da granulometria e das porosidades variadas dos componentes do RCC (LOVATO, 2007).

Os RCCs, como os provenientes de alvenaria, por exemplo, possuem uma variedade de materiais de construção com propriedades muito diferentes, e essa diversidade de materiais é refletida na variação da massa específica das partículas (MUELLER *et al.*, 2015), e conseqüentemente dos agregados reciclados. Segundo Miranda e Selmo (2006) a variabilidade nos agregados miúdos reciclados de RCC podem estar relacionados principalmente a seus constituintes minerais e distribuição de tamanho de grãos.

Outro fator que afeta a variabilidade dos valores encontrados é o método de ensaio empregado, visto que as normas utilizadas foram desenvolvidas para agregados naturais e os agregados reciclados são materiais diferentes dos naturais, sendo mais porosos e frágeis (LOVATO, 2007). Segundo John e Ângulo (2003), não é recomendado utilizar as normas e especificações de agregados naturais para agregados reciclados, essas podem servir de ponto de partida, mas revelam-se limitantes e restritivas.

#### 2.1.2.2 Absorção

A absorção de água é a propriedade na qual os valores obtidos para os agregados reciclados mais diferem dos agregados naturais (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; MEDJIGBODO *et al.*, 2018). Além disso, a absorção tem grande influência nas propriedades do concreto (AMARIO, 2015).

Os agregados reciclados por serem provenientes do RCC são mais porosos e naturalmente mais absorventes, pois podem ser compostos por materiais cerâmicos e conterem argamassa aderidos aos grãos, conseqüentemente, apresentam taxas de absorção mais altas que os agregados naturais (LIMA, 1999; ANDRADE, 2018; BAIRAGI *et al.*, 1993; PADMINI *et al.*, 2009; POON *et al.*, 2002; PEPE *et al.*, 2014a; PEPE *et al.*, 2016, MEDJIGBODO *et al.*, 2018).

Os agregados reciclados de concreto, devido à argamassa aderida aos mesmos, apresentam maior absorção de água quando comparados aos agregados naturais (MANZI *et al.*, 2013; ACPA, 2009). Devido ao agregado reciclado apresentar além de menor massa específica, maior absorção de água e maior porosidade sua aplicação ocorre em baixa escala (TAM; TAM, 2007).

De acordo com Amario (2015) após 24 horas de ensaio os valores encontrados para a absorção total dos agregados reciclados podem variar significativamente, isto vai depender da composição do agregado e da sua granulometria. Existe uma simples relação entre porosidade e a absorção, quanto mais poroso os materiais de origem do agregado reciclado maior a taxa de absorção. Werle (2010) explica que a absorção de água ocorre através da rede de poros do agregado, quanto mais poroso maior a absorção do fluido para o interior do sólido. Deste modo, os agregados reciclados de cerâmica apresentam absorção maior que os reciclados de concreto (AMARIO, 2015; ANDRADE, 2018).

Padmini *et al.* (2009) acreditam que existe uma relação entre capacidade de absorção do agregado e resistência do concreto de origem, na qual afirmam que quanto mais resistente o concreto, maior a quantidade de argamassa aderida ao agregado reciclado, portanto maior é a absorção de água deste. Nos concretos menos resistentes, durante a britagem ocorre uma maior separação entre o agregado natural e a argamassa aderida ao mesmo, de modo que os grãos de agregado reciclado produzidos apresentam menores quantidade de argamassa aderida (PADMINI *et al.*, 2009).

Pedro *et al.* (2014) analisou em seu estudo, diferentes formas de processamento do agregado reciclado de diferentes fontes, variando os valores de resistência do concreto de origem e Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016) também variaram a resistência do concreto de origem do agregado reciclado. Verificou-se que as propriedades como a absorção de água dos agregados variam

com a resistência do concreto de origem, no entanto, quanto maior a resistência do concreto de origem menor a absorção do agregado reciclado, o que contradiz a afirmação de Padmini *et al.* (2009).

A Tabela 4 apresenta alguns valores de absorção para o agregado reciclado e natural, observa-se que os agregados reciclados apresentam uma absorção muito superior ao agregado natural. Resultado semelhante é encontrado por Verian *et al.* (2018), na qual os valores de absorção para agregado natural variaram de 0,34% a 3,00% e do ARCO variou de 0,50% a 14,75%. Observa-se que existe uma grande variação dos valores de absorção encontrados, isto é decorrente da variabilidade dos agregados reciclados e da quantidade de argamassa aderida ao mesmo.

Tabela 4 – Valores de absorção (%) dos agregados reciclados e naturais.

Autores	Absorção	
	Agregado Reciclado	Agregado Natural
Manzi <i>et al.</i> (2013)	7,00- 9,00	1,20
Medjigbodo <i>et al.</i> (2018)	10,70	1,20
	5,30	0,56
	4,90	0,53
Seara-Paz <i>et al.</i> (2016)	5,40	2,20
Lotfy e Al-Fayez (2015)	11,57	0,60
	5,40	0,89
Tam <i>et al.</i> (2015)	2,68	0,57
Pedro <i>et al.</i> (2017)	6,10 (fino)	0,20 (fino)
	3,60- 3,90 (gráudo)	1,30 (gráudo)
Fathifazi <i>et al.</i> (2011)	3,30 - 5,40	0,34 - 0,89
Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016)	3,74 - 5,91	1,29 - 2,13
Liu <i>et al.</i> (2011)	5,26 - 6,9	0,40
Kurda <i>et al.</i> (2017)	5,00	1,40
Yehi e Abdelfatah (2016)	2,80 - 5,90	1,40 - 1,70
Verian <i>et al.</i> (2013)	5,30- 5,40	1,30 - 2,70
Amer <i>et al.</i> (2016)	5,05	0,96

FONTE: Autora (2022).

A determinação da capacidade de absorção dos agregados reciclados é de suma importância na confecção de concretos com agregado reciclado, visto que o agregado reciclado absorve água da pasta e compromete a trabalhabilidade

do concreto (MEDJIGBODO *et al.*, 2018), sendo necessário avaliar a necessidade de compensação de água da mistura (WERLE, 2010).

### 2.1.2.3 Resistência à compressão e Módulo de Elasticidade

Determinar a resistência do agregado é importante, pois essa propriedade pode ser um limitador para seu uso em concretos de alta resistência, acima de 50MPa. De acordo com Carrijo (2005) os agregados reciclados apresentam menor resistência e módulo de elasticidade que os agregados naturais.

A resistência à compressão do agregado graúdo pode ser determinada de forma indireta através da resistência à compressão do concreto, para isso, basta substituir os agregados graúdos de um concreto com resistência conhecida pelos agregados graúdos reciclados, se a resistência do concreto com agregado reciclado apresentar menor valor e se os grãos se romperem durante a ruptura do corpo de prova, deduz-se que a resistência do agregado é inferior à resistência à compressão desse concreto (AMARIO, 2015).

De acordo com Silva *et al.* (2019) os métodos disponíveis para determinar as propriedades mecânicas de partículas de um único agregado são falhos, pois não fornecem seu módulo de elasticidade e também são apenas semiquantitativos. Silva *et al.* (2019) desenvolveram um método simples de ensaio que permite determinar a resistência e módulo de elasticidade de partículas individuais de agregado graúdo quando submetidas à compressão. No entanto, o método desenvolvido por Silva *et al.* (2019) é para materiais homogêneos, não sendo aplicado aos agregados reciclados devido a sua heterogeneidade.

O módulo de elasticidade também pode ser obtido correlacionado o valor do módulo de elasticidade do concreto com o do agregado, pois o módulo de elasticidade do concreto é maior quanto maior for o módulo de elasticidade do agregado (AMARIO, 2015). Carrijo (2005) verificou que os agregados com menor massa específica, apresentam menor módulo de elasticidade. Este resultado é coerente, visto que, quanto menor a massa específica, mais poroso é o agregado, e conseqüentemente, mais susceptível a deformação, bem como menor a resistência mecânica.

Segundo Pepe *et al.* (2018) a porosidade do agregado reciclado domina o comportamento mecânico das partículas e este comportamento está diretamente relacionado as propriedades físicas dos agregados.

#### 2.1.2.4 Granulometria

A granulometria dos agregados é uma característica fundamental para a determinação de propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, absorção de água e permeabilidade (AMARIO, 2015), sendo de suma importância para o estudo de dosagem, pois afeta diretamente a trabalhabilidade do concreto no estado fresco (ANDRADE, 2018). Leite (2001) afirma que para produzir concretos trabalháveis e com grau de compacidade satisfatória é necessário cautela na composição granulométrica dos agregados reciclados.

A composição granulométrica dos agregados reciclados varia com o tipo de resíduo que é beneficiado, bem como os equipamentos utilizados no beneficiamento dos mesmos e a granulometria inicial do resíduo, sendo assim, espera-se que agregados provenientes de diferentes resíduos apresentem curvas granulométricas diferentes, características do tipo de resíduo utilizado (LIMA, 1999).

No entanto, de acordo com Levy (2001), não deve ser adotado como critério absoluto a utilização da curva granulométrica como parâmetro para seleção do agregado a ser utilizado na produção de concreto, devendo apenas ser utilizado como um critério de orientação, no intuito de prever a trabalhabilidade do concreto.

#### 2.1.2.5 Forma/Textura/Aderência dos grãos

Assim como na composição granulométrica, a forma e a textura dos grãos dos agregados reciclados também dependem do tipo de resíduo que é beneficiado, bem como dos equipamentos utilizados no beneficiamento (AMARIO, 2015). Segundo Butler (2003), a forma do agregado é depende do tipo de britador utilizado e do ajuste que é realizado na abertura do mesmo. De acordo com Bazuco (1999), o britador de mandíbulas gera partículas de forma mais angular, enquanto o britador giratório produz partículas mais arredondadas.

Geralmente os agregados reciclados apresentam uma forma mais lamelar, angular, e uma textura mais porosa e rugosa, comparado com os agregados naturais, devido à argamassa que fica aderida às partículas do agregado reciclado (LEITE, 2001; AMARIO, 2015).

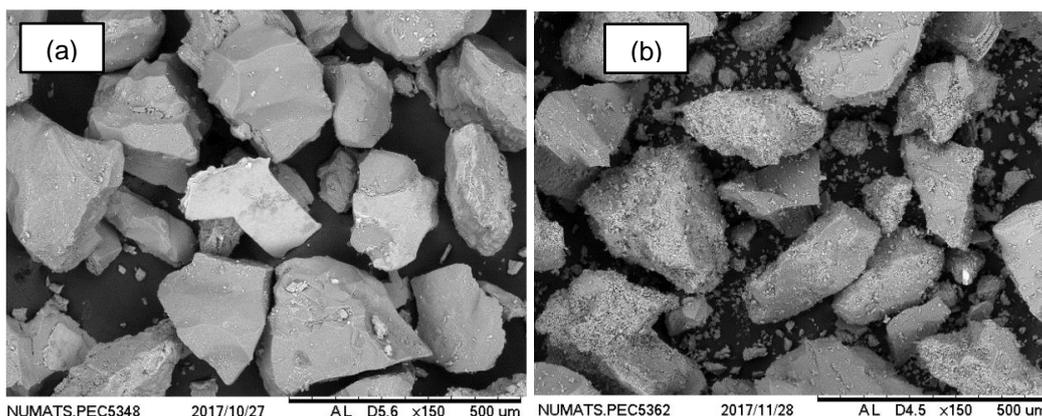
De acordo com Leite (2001) e Lima (1999), essa forma mais angular dos agregados reciclados diminui a trabalhabilidade da mistura, devido a um maior atrito entre os grãos. Diante disso, pode ser necessário aumentar o teor de água e aglomerante da mistura para garantir a trabalhabilidade (AMARIO, 2015). No entanto, este aumento deve ser realizado de forma cautelosa para não prejudicar as propriedades mecânicas do concreto devido ao aumento da relação água/cimento (LIMA, 1999).

A forma angular e a textura rugosa dos agregados reciclados melhoram a aderência entre a pasta e o agregado, pois o agregado reciclado tem maior absorção da pasta de cimento por seus poros quando comparado ao agregado natural (LEITE, 2001). Desta forma, a maior aderência entre a pasta e os agregados reciclados pode melhorar o desempenho final dos concretos (LEITE, 2001).

O agregado miúdo reciclado apresenta menor densidade e maior absorção de água que o agregado natural, o que pode estar associado a textura mais rugosa do grão e ao teor de argamassa aderido, conforme Figura 2.

Figura 2 – Imagens geradas pelo microscópio eletrônico:

(a) Agregado Natural; (b) Agregado Miúdo Reciclado.



FONTE: Andrade (2018).

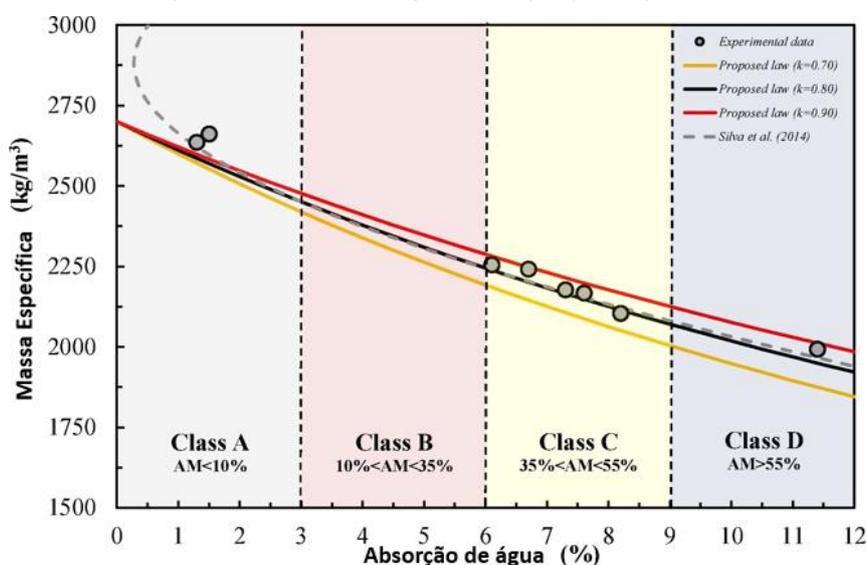
### 2.1.2.6 Teor de Argamassa Aderida

A argamassa aderida ao agregado reciclado possui grande influência nas propriedades do mesmo. Desta forma, quantificar o teor de argamassa aderida é de suma importância para determinar a qualidade do agregado reciclado. De acordo com Rangel *et al.* (2019) para a compressão das demais propriedades dos agregados reciclados, a caracterização das ARCO deve ser complementada com a avaliação do teor de argamassa aderida.

Segundo Ferreira (2007) o choque térmico nos agregados reciclados propicia a desagregação da argamassa aderida e separação dos componentes. Ferreira (2007) propõe um método que utiliza o choque térmico para obter o teor de argamassa aderida nos agregados reciclados. O método consiste em desagregar a argamassa aderida ao grão através da aplicação de uma grande diferença de temperatura aos grãos de agregado reciclado, facilitando a remoção da argamassa aderida aos mesmos.

Amario (2019) também propõe um método utilizando o choque térmico para quantificar o teor de argamassa aderida, o mesmo é baseado nos métodos de Pepe *et al.* (2014) e Pandurangan *et al.* (2016). Amario (2019) e Rangel *et al.* (2019) propõe uma classificação para os agregados de acordo com a absorção de água e teor de argamassa aderida (AA) e massa específica, conforme Figura 3.

Figura 3 – Classificação do agregado graúdo.



FONTE: Rangel *et al.* (2019).

Sanchez (2004) utiliza outra forma para retirada da argamassa aderida, na qual usa ácido clorídrico para promover a desintegração e separação da argamassa aderida. Jordani (2016) apresenta um método para quantificar a argamassa aderida em duas etapas se baseando nas propostas de Ferreira (2007) e Sanchez (2004), a primeira etapa consiste em submeter o agregado reciclado ao choque térmico e posteriormente, imergi-lo em ácido clorídrico.

#### 2.1.2.7 Abrasão *Los Angeles*

O teste de abrasão de *Los Angeles* (LA) permite medir a quantidade de partículas que se degradam, em termos de perda em massa em porcentagem, em decorrência do impacto de esfera de aço e dos agregados, em condições padrões estabelecidos (VERIAN *et al.*, 2018; APCA, 2009).

De acordo com Leite (2001), os agregados reciclados apresentam menor resistência ao desgaste por abrasão que os agregados naturais, devido a presença da argamassa aderida e sua maior porosidade. Desta forma, os valores de perda de massa por abrasão LA são mais altos para ARCO que para o agregado natural (VERIAN *et al.*, 2018; APCA, 2009).

A Tabela 5 apresenta resultados de abrasão LA (%perda de massa) do agregado reciclado e agregado natural de diferentes autores, na qual é possível verificar que os valores de perda de massa (%) tendem a ser superiores para o ARCO. Com exceção de Verian *et al.* (2013) e Zega e Di Maio (2009), na qual a perda de massa (%) foi maior no agregado natural que no reciclado, o que mostra que a qualidade da argamassa aderida tem influência na resistência à abrasão, podendo ser mais resistente que o próprio agregado natural.

Os valores do teste de abrasão *Los Angeles* devem estar dentro de limites especificados em norma para seu uso no concreto. De acordo com a ABNT NBR 7211(2009) - Agregados para concreto – Especificação, o valor do índice de desgaste por abrasão Los Angeles, determinado segundo a ABNT NBR NM 51 (2000) - Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”, deve ser inferior a 50%, em massa, do material. As especificações podem dispensar o teste de abrasão LA, se os agregados tiverem registro de bom desempenho (APCA, 2009).

Tabela 5 – Abrasão LA (%perda de massa) de diferentes autores.

Autores	Resistência à abrasão (%)	
	Agregado Reciclado	Agregado Natural
Seara-Paz <i>et al.</i> (2016)	34,28	23,10
Pedro <i>et al.</i> (2017)	32,3	28,4
	33,0	
Kurda <i>et al.</i> (2017)	43	28
Yehi e Abdelfatah (2016)	20,6 - 35,0	19, 1 - 24,6
Amer <i>et al.</i> (2016)	51,5	38,9
Verian <i>et al.</i> (2013)	29 - 31	34 - 36
Zega e Di Maio (2009)	51,6	59,8

FONTE: Autora (2022).

## 2.2 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

Os concretos confeccionados com agregado reciclado apresentam características e propriedades diferentes dos concretos convencionais em decorrência do tipo e da qualidade dos agregados reciclados utilizados (LOVATO, 2007). A qualidade dos agregados reciclados difere do agregado natural, devido a argamassa aderida no ACR, o que pode afetar o desempenho do concreto (VERIAN *et al.*, 2013). A utilização de agregados com propriedades aceitáveis para se obter um concreto com desempenho adequado é fundamental, no entanto, a proporção de misturas e o método de produção do concreto também são importantes na qualidade do concreto (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a).

### 2.2.1 Propriedades dos Concretos com Agregado Reciclado

O concreto com agregado reciclado quando comparado ao convencional apresenta maior absorção de água e índice de vazios (ANDRADE, 2018), isto ocorre em função da menor massa específica, além da permeabilidade e composição dos agregados reciclados (CARRIJO, 2005). Segundo Medjigbodo (2018) o uso dos agregados reciclados modifica as propriedades do concreto como: resistência, porosidade, permeabilidade e retração.

As propriedades dos agregados influenciam nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (SANTOS *et al.*, 2017), principalmente na massa específica, trabalhabilidade, resistência, módulo de elasti-

cidade e durabilidade. Sendo assim, as características dos agregados reciclados, como maior absorção e porosidade que o agregado natural, podem afetar o desempenho do concreto. Desta forma, as propriedades mecânicas e as características de durabilidade do concreto com agregado reciclado também devem ser determinadas para garantir o uso adequado do mesmo (RAHAL, 2007).

#### 2.2.1.1 Massa Específica

A massa específica do agregado reciclado é menor que o do agregado natural, diante disso, o concreto com agregado reciclado possui massa específica inferior ao concreto convencional, devido ao valor de massa específica do ACR mais baixo e a maior quantidade de vazios incorporadas ao concreto (LEITE, 2001; LIMA, 1999). De acordo com Verian *et al.* (2018), tanto a menor massa específica do ACR, como a presença de argamassa aderida ao mesmo contribuem para que o valor de massa específica do concreto com agregado reciclado seja inferior ao concreto com agregado natural. Desta forma, a massa específica do concreto varia proporcionalmente a massa específica do agregado, ou seja, quanto menor a densidade do ACR, menor a massa específica do concreto (MATIAS *et al.*, 2013).

Estudos relatam que ocorre uma diminuição da massa específica do concreto conforme é aumentado o teor de substituição do agregado reciclado (AMARIO, 2015; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; XIAO *et al.*, 2005; DONG *et al.*, 2013). A Tabela 6 apresenta resultados da literatura, na qual é possível verificar um concreto convencional com agregado natural e o concreto com agregado reciclado com diferentes teores de substituição, 25%, 50% e 100%. Observa-se que todos os concretos com agregado reciclado apresentam menor massa específica que o concreto de referência. Nos concretos com agregado reciclado verifica-se que quanto maior o teor de substituição, menor é a massa específica do concreto. Essa tendência também é observada nos estudos realizados por Xiao *et al.*, (2005) e Dong *et al.* (2013), Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016) e Seara-Paz *et al.* (2016).

Tabela 6 - Massa específica do concreto (kg/dm<sup>3</sup>).

Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	
Concreto com agregado convencional (0% ACR)	2,42
Concreto com agregado reciclado (25% ACR)	2,40
Concreto com agregado reciclado (50% ACR)	2,39
Concreto com agregado reciclado (100% ACR)	2,34

FONTE: Etxeberria *et al.* (2007).

De acordo com o estudo de Etxeberria *et al.* (2007), a massa específica reduz aproximadamente 3,3% quando todo o agregado natural é substituído pelo reciclado e cerca de 1,24% para o teor de substituição de 50%. Segundo a pesquisa realizada por Xiao *et al.*, (2005), a redução da massa específica do concreto reciclado com 50% de substituição foi próximo de 2,37% e para o teor de 100% em torno de 5,08%. No entanto, os resultados de Dong *et al.* (2013) indicam que para um teor de 50% de substituição a redução da massa específica foi cerca de 0,8%. Essa variação nos valores de redução da massa específica do concreto é em decorrência da variabilidade dos agregados reciclados.

Poon e Chan (2007) afirmam que existe uma relação entre massa específica e absorção de água, na qual a absorção de água diminui com o aumento da massa específica.

#### 2.2.1.2 Trabalhabilidade

Os concretos produzidos com agregados reciclados apresentam menor trabalhabilidade comparado aos concretos convencionais de mesmo traço (AMARIO, 2015). Isto ocorre devido às características dos agregados reciclados, como a maior porosidade e forma angular, textura áspera, resultando em um aumento da absorção de água e afetando a trabalhabilidade da mistura (LEITE *et al.*, 2013; LOVATO, 2007). Segundo Reis (2009), a propriedade do concreto fresco mais afetada pelo uso do agregado reciclado é a trabalhabilidade, principalmente devido à forma irregular, à textura rugosa e às altas taxas de absorção do agregado, sendo muitas vezes necessário adotar medidas compensatórias (AMARIO, 2015). De acordo com Etxeberria *et al.* (2007a), em geral, é a alta capacidade de absorção do agregado reciclado que afeta diretamente a trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado.

Os agregados reciclados se utilizados em condições secas reduzem bastante a trabalhabilidade do concreto, devido a absorção dos ACRs (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a). Desta forma, buscando melhorar a trabalhabilidade, é necessária uma correção da relação água/cimento, no entanto, isso pode afetar as propriedades do concreto no estado endurecido. As propriedades do concreto que incorpora agregados reciclado são afetadas pelas propriedades do agregado, especialmente em termos de absorção de água, se não houver métodos de controle tecnológico adotadas em sua produção (FERREIRA *et al.*, 2011).

Deve-se ainda ter cautela na dosagem para se estabelecer a quantidade de água necessária que garanta a trabalhabilidade da mistura, sem excesso de água e sem a utilização de muito cimento, no intuito de atingir a resistência desejada sem inviabilizar financeiramente a produção do concreto com agregado reciclado (LEITE, 2001).

Segundo Etxeberria *et al.* (2007a), o agregado graúdo reciclado deve ser molhado antes de ser utilizado na confecção do concreto, pois o mesmo apresenta alta capacidade de absorção e se o mesmo não estiver úmido, ele absorverá a água da mistura afetando a trabalhabilidade do concreto e o controle da relação água/cimento. No entanto, atualmente existem diferentes métodos para compensar a perda de água da mistura para o agregado reciclado, como a sua utilização na condição saturada de superfície seca e métodos de compensação de água de acordo com absorção do agregado.

Tabela 7 - Métodos para compensar a perda de água da mistura.

<b>Método</b>	<b>Autores</b>
Agregado pré-saturado	Manzi <i>et al.</i> (2013), Medjigbodo <i>et al.</i> (2018), Seara-paz <i>et al.</i> (2016), Tam <i>et al.</i> (2015), Fathifazl <i>et al.</i> (2011), Verian <i>et al.</i> (2018), Amer <i>et al.</i> (2016), Pepe <i>et al.</i> (2016), Pepe <i>et al.</i> (2014), Saravanakumar <i>et al.</i> (2016), Omary <i>et al.</i> (2016), McGinnis <i>et al.</i> (2017), Akça <i>et al.</i> (2015), Verian <i>et al.</i> (2018).
Compensação de água	Pedro <i>et al.</i> (2014), Pedro <i>et al.</i> (2017), Cbral <i>et al.</i> (2010), Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), Leite e Monteiro (2016).

FONTE: Autora (2022).

Silva *et al.* (2015a) ao longo de uma revisão de literatura afirmou que a maioria dos pesquisadores utilizava o agregado reciclado na condição pré-saturada. A Tabela 7 apresenta os métodos adotados por alguns autores nos últimos dez anos, percebe-se que a utilização do agregado pré-saturado continua sendo preponderante nos trabalhos desenvolvidos.

Devido a trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado diminuir em decorrência da alta tendência de absorção de água do ACR, além dos métodos de compensação e de utilizar o agregado pré-saturado, utiliza-se superplastificante para se obter a trabalhabilidade adequada (AKÇA *et al.*, 2015). Trabalhos como o de Hanumesh *et al.* (2018) utilizam o agregado graúdo reciclado misturado a seco, adicionando aditivo superplastificante até que a mistura fique homogênea. A maneira mais prática para melhorar o desempenho dos concretos com agregado reciclado é o uso de superplastificante (BRAVO *et al.*, 2018).

No entanto, os concretos com agregado reciclado apresentam menor trabalhabilidade que o concreto convencional necessitando de uma quantidade superior de aditivo (ETXEBERRIA *et al.* 2007a). De acordo com Amer *et al.* (2016), o concreto com agregados reciclados secos requer uma grande quantidade de superplastificante para atingir os parâmetros reológicos adequados. Nos agregados reciclados pré-saturados a dose necessária de superplastificante é menor, sendo assim, o uso de agregados reciclados pré-saturados é melhor para manter uma dose adequada de superplastificante (AMER *et al.*, 2016).

Na literatura o uso de superplastificante ou redutor de água é uma prática comum na confecção dos concretos com agregados reciclados (VERIAN *et al.*, 2018; BRAVO *et al.*, 2018; SARAVANAKUMAR *et al.*, 2016; OMARY *et al.*, 2016; DAS *et al.*, 2018; HANUMESH *et al.*, 2018; PUTHUSSERY *et al.*, 2017; ETXEBERRIA *et al.*, 2007a; MANZI *et al.*, 2013; MEDJIGBODO *et al.*, 2018; SEARAPAZ *et al.*, 2016; LOTFY E AL-FAYEZ, 2015; PEDRO *et al.*, 2014; FATHIFAZL *et al.*, 2011; GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA, 2016). Bravo *et al.* (2018) avaliou os superplastificantes e verificou que os policarboxílicos são mais adequados ao concreto com agregado reciclado que o lignosulfonato.

### 2.2.1.3 Resistência à Compressão

A resistência à compressão dos concretos com agregado reciclado segue a Lei de Abrams, já havendo um consenso na literatura quanto a isto, no entanto, a substituição de agregados naturais por agregados reciclados modifica a resistência à compressão do concreto, que geralmente apresentam menores valores de resistência que o concreto confeccionado com agregado natural (CABRAL *et al.*, 2010). Segundo Lima (1999), o concreto com agregado reciclado apresenta resistência igual ou menor que os concretos com agregado natural. Reis (2009) afirma que geralmente apresenta menor resistência, e em apenas alguns casos específicos, a resistência pode ser maior (AMARIO, 2015).

Puthussery *et al.* (2017) afirmam que nenhuma diferença significativa foi observada na resistência à compressão de várias misturas de concreto confeccionados com agregados naturais e reciclados. Leite (2001) verificou um aumento da resistência à compressão nos concretos com substituição de agregado miúdo reciclado em comparação ao concreto convencional. No entanto, variando os teores de agregado graúdo e miúdo reciclados, Lovato (2007) concluiu que todos os traços com agregados reciclados apresentaram valores de resistência menores que o do concreto convencional. De acordo com Cabral *et al.* (2010) os agregados graúdos reciclados possuem mais influência na resistência à compressão que o agregado miúdo reciclado. Leite (2001) verifica que um aumento no teor de substituição por agregados graúdos reciclados tende a diminuir a resistência à compressão.

O teor de substituição dos agregados, bem como a composição do agregado reciclado e a relação água/cimento são fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto com agregado reciclado. Segundo Kwan *et al.* (2013), a substituição de até 80% ainda é aceitável se adotada um método de mistura adequado para atingir a resistência à compressão pretendida. De acordo com Lovato (2007), Xiao *et al.* (2012) e Sim e Park (2011), ocorre uma diminuição da resistência com o aumento do teor de substituição por agregados reciclados, além de concluírem que a relação água/cimento é fator determinante na resistência final do concreto. Rao *et al.* (2007) afirmam que além da relação água/ci-

mento, a resistência à compressão dos concretos com agregado reciclado é influenciada também pela composição do resíduo utilizado para produzir o agregado reciclado, bem como pela taxa de substituição, e ainda pela condição de umidade do agregado reciclado, se saturado ou não saturado.

Lima (1999) afirma que nos concretos com agregado reciclado de concreto a diminuição da resistência pode chegar a 30%, enquanto que nos concretos com agregado reciclado de alvenaria esta diminuição pode ser de até 50%, dependendo ainda da composição e do consumo do cimento. No entanto, em relação à resistência à compressão do concreto com agregado reciclado, o fator limitante é o próprio agregado reciclado, pois ele é o principal responsável pelo aumento da porosidade do concreto (TENÓRIO, 2007). Quanto maior a porosidade, menor a massa específica, e de acordo com Poon e Chan (2007), a relação entre massa específica e resistência à compressão tem uma tendência típica, a resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados reciclados aumenta com o aumento da massa específica. Devido a menor massa específica do agregado reciclado, existe uma tendência que o concreto com agregado reciclado apresente menor resistência à compressão.

Na literatura verifica-se resultados na qual a resistência à compressão em 28 dias foi em média 90% do valor para o concreto com agregado natural para a mesmas proporções de mistura (RAHAL, 2007). Etxeberria *et al.* (2007a) afirmam que o concreto com agregado reciclado, com teor de 25% de agregados graúdos reciclados e com resistência média à compressão de 30 MPa a 45 MPa alcança as mesmas propriedades mecânicas do concreto convencional, empregando a mesma quantidade de cimento e a mesma relação água/cimento efetiva. Além disso, o concreto com agregado reciclado mostra tendência similares ao concreto com agregado natural no desenvolvimento da resistência à compressão (RAHAL, 2007). De acordo com Rahal (2007), os concretos com agregado reciclados ganham resistência mais rápida que o concreto natural até a idade de 7 dias (RAHAL, 2007), mas nos últimos 21 dias do período de cura, completando 28 dias, ocorreu um aumento de aproximadamente 12% a 15% da resistência à compressão no concreto com ARC, enquanto que a resistência do concreto com agregado natural aumentou aproximadamente 20% (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a).

De acordo com Rahal (2007), é possível aumentar a resistência do concreto reciclado, se diminuir a relação água/cimento e se utilizar redutores de água para manter a trabalhabilidade adequada. No entanto, o aumento da relação água/cimento pode ser economicamente não viável. Segundo Etxeberria *et al.* (2007a), o concreto com 100% de agregado graúdo reciclado, além de apresentar 20 a 25% de resistência à compressão menor do que o concreto convencional em 28 dias, necessita de grande quantidade de cimento para alcançar uma alta resistência à compressão e, desta forma, não é uma proposta econômica rentável. Os agregados reciclados devem ser utilizados em concretos com baixa e média resistência à compressão (20 a 45 MPa) (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a), pois nos concretos com agregado reciclado de alta resistência, devido a presença de argamassa aderida ao agregado, a resistência do ACR é menor que os agregados convencionais. Conseqüentemente, o agregado reciclado é a região mais fraca do concreto com agregado reciclado quando se utiliza uma pasta de cimento de média a alta resistência (45 a 60 Mpa) (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a).

#### 2.2.1.4 Resistência à Tração

O concreto apresenta uma baixa resistência à tração, sendo os esforços de tração resistidos pela armadura nos elementos de concreto armado. No entanto, na análise do comportamento de novos materiais, como o caso do concreto com agregado reciclado, é importante considerar essa propriedade (LEITE, 2001). Bazuco (1999) afirma que os concretos com agregado graúdo reciclado possuem às mesmas relações teóricas entre resistência à tração e resistência à compressão que os concretos convencionais.

No entanto, Bazuco (1999) destaca que ao utilizar o agregado miúdo reciclado, tal propriedade apresenta uma redução da ordem de 10% a 20%. De acordo com Puthussery *et al.* (2017), apenas nas misturas com 25% de agregados reciclado miúdos obteve-se resistência à tração comparável ao concreto com agregado natural, as outras misturas apresentaram resistência à tração significativamente menor.

Segundo Leite (2001) a resistência à tração diminui com o aumento do teor de agregado graúdo reciclado, enquanto aumenta com o aumento do teor de agregado miúdo reciclado. Desta forma, existe uma relação entre a resistência e a dimensão da partícula, na qual a resistência à tração é inversamente proporcional a dimensão do agregado reciclado, pois quanto maior a dimensão do grão, menor será sua resistência à tração (Leite, 2001).

Devido às propriedades dos agregados reciclados como a textura rugosa e a forma angular, esses agregados proporcionam uma melhor aderência, o que poderia contribuir para uma maior resistência à tração dos concretos com agregado reciclado (AMARIO, 2015). Segundo estudo de Etxeberria *et al.* (2007a), o concreto com agregado reciclado obteve resistência à tração superior ao do concreto com agregado natural. A resistência à tração foi similar para todos os concretos produzidos (25%, 50% e 100%) e o teor de 25% apresentou o maior valor de resistência à tração (Etxeberria *et al.*, 2007a).

#### 2.2.1.5 Módulo de Elasticidade

Rahal (2007) afirma que além da resistência do concreto, é importante conhecer o módulo de elasticidade para que o mesmo seja utilizado com confiança nos elementos estruturais. De acordo com Cabral *et al.* (2010), o uso de agregados reciclados no concreto em substituição ao natural modifica o módulo de elasticidade do concreto, geralmente apresentando valores inferiores ao concreto convencional. Segundo Etxeberria *et al.* (2007), o módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado é menor do que o concreto com agregado convencional. Os agregados graúdos reciclados possuem mais influência no módulo de elasticidade que o agregado miúdo reciclado (CABRAL *et al.*, 2010).

Nos concretos com resistência à compressão entre 25 e 30 MPa, o módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado foi 3% menor que o concreto com agregado natural (RAHAL, 2007). De acordo com a pesquisa realizada por Etxeberria *et al.* (2007), o módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado é menor que o concreto com agregado natural para todos os teores de substituição (25%, 50% e 100%), conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Módulo de Elasticidade (MPa).

Módulo de Elasticidade (MPa)	
Concreto com agregado natural	32,56
Concreto com agregado reciclado (25%)	31,30
Concreto com agregado reciclado (50%)	28,59
Concreto com agregado reciclado (100%)	27,76

FONTE: Etxeberria et al. (2007).

Observa-se na Tabela 8, que o módulo de elasticidade dos concretos com agregado reciclado diminui à medida que o teor de substituição aumenta. De acordo com o estudo de Etxeberria *et al.* (2007), o módulo de elasticidade reduziu aproximadamente 14,75% quando todo o agregado natural é substituído pelo reciclado e cerca de 12,19% para o teor de substituição de 50%, e próximo de 3,75% para 25% de substituição.

Segundo Safiuddin *et al.* (2013), o concreto com 100% de ACR apresentou um módulo de elasticidade 17,7% menor que o concreto com agregado convencional. Dong *et al.* (2013) obteve em sua pesquisa um módulo de elasticidade para o concreto com 50% de teor de substituição por agregado reciclado, 11,69% menor que o concreto com agregado natural. Esta tendência é coerente, visto que os agregados reciclados são mais propensos à deformação do que os agregados naturais (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a), pois ACR apresentam uma estrutura mais porosa, devido a presença da argamassa aderida.

#### 2.2.1.6 Durabilidade

O agregado reciclado além de influenciar nas propriedades mecânicas do concreto reciclado também afeta a durabilidade do mesmo no estado endurecido (LOVATO, 2007). As propriedades mecânicas estão relacionadas à capacidade do concreto em resistir aos esforços solicitantes (ANDRADE, 2018), e a durabilidade é uma propriedade do concreto em resistir às influências externas ao longo do tempo.

A ABNT NBR 6118 (2014) descreve durabilidade como a capacidade da estrutura em resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Já a ABNT NBR 15575-1 (2021), conceitua durabilidade

como a capacidade de desempenhar sua função ao longo do tempo, considerando o uso e a manutenção adequada. Desta forma, durabilidade é um conceito qualitativo que está associado a um parâmetro quantitativo, o tempo (CEOLIN; LIBRELOTTO, 2016). Este período de tempo que o sistema ou produto deverá manter o desempenho requerido é definido como vida útil (ABNT NBR 15575, 2021).

A durabilidade de um elemento de concreto é dependente da capacidade de um fluido penetrar na microestrutura do concreto, permitindo a introdução de moléculas (por exemplo, dióxido de carbono, íons cloreto) que reagem e destroem sua estabilidade química (EVANGELISTA; BRITO, 2010). No desenvolvimento de novos materiais é de suma importância determinar a durabilidade dos mesmos e as propriedades que a afetam. A durabilidade está relacionada com a facilidade de entrada de agentes agressores (fluídos) para o interior do concreto, e apesar de existir diversos fatores que afetem a durabilidade, a permeabilidade e a capacidade de absorção do concreto são determinantes para a durabilidade do mesmo.

De acordo com Ann *et al.* (2008), o concreto com agregado reciclado forma uma estrutura de poros mais aberta, em comparação com concreto com agregado natural. Sendo assim, os agregados reciclados por ser mais poroso que os naturais, possuem uma maior taxa de absorção e tendem a diminuir a durabilidade dos concretos com agregado reciclado, apresentando menores valores de vida útil. De acordo com Olorunsogo e Padayachee (2002) e Bravo *et al.* (2015), a durabilidade dos concretos com agregado reciclado diminui com o aumento dos teores de agregados reciclados no concreto, concluindo que o uso de agregados reciclados no concreto prejudica a qualidade do mesmo.

Olorunsogo e Padayachee (2002) analisaram a durabilidade do concreto com agregado reciclado utilizando indicadores de durabilidade: condutividade de cloretos, permeabilidade e absorção de água, na qual concluíram que os concretos com agregado reciclado apresentaram baixo desempenho devido a fissuras desenvolvidas nos agregados de RCC durante o processo de beneficiamento, tornando o concreto com o agregado reciclável suscetível à permeação, difusão e absorção de fluidos. No entanto, Sim e Park (2011) afirmam que o concreto com agregado reciclado é capaz de resistir à penetração de íons cloro.

A durabilidade dos concretos com agregado reciclado é complexa, devido à porosidade dos ACR e à origem dos resíduos, no entanto, esta propriedade exerce elevada influência no desempenho do concreto frente aos agentes agressores (ANDRADE, 2018).

### **2.2.2 Concreto Estrutural com Agregado Reciclado**

O concreto com agregado reciclado apresenta variabilidade nas suas propriedades, isto provavelmente é atribuído a diferentes origens do RCD e heterogeneidade dos agregados reciclados (ANDRADE, 2018). Porém, com a seleção adequada dos resíduos que darão origem ao agregado reciclado, como resíduos de concreto estrutural de boa qualidade, e o beneficiamento apropriado é possível produzir concretos com alta resistência (LIMA, 1999).

De acordo com Xie *et al.* (2018), o agregado de concreto reciclado está atualmente sendo considerado como um agregado alternativo para o concreto estrutural. No entanto, Lotfy e Al-Fayez (2015) afirmam que o agregado reciclado de concreto só será considerado efetivamente um substituto do agregado natural, se houver produção industrial de qualidade controlada. Lotfy e Al-Fayez (2015) pesquisaram sobre o potencial do concreto com agregado reciclado em aplicações de alto risco, utilizando misturas experimentais de concreto confeccionado com agregado reciclado produzido comercialmente, sujeito a um alto nível de qualidade, obtendo resultados que permitem o uso do concreto com agregado reciclado em elementos estruturais.

Segundo Etxeberria *et al.* (2007), existem diversos estudos sobre o uso de agregados reciclados, e de fato, nenhum dos resultados afirmam que os agregados reciclados são inadequados para o uso estrutural. Pedro *et al.* (2017) confirmam que é possível produzir concretos estruturais incorporando grandes quantidade de agregados reciclados, tanto miúdo quanto graúdo, desde que garantida a qualidade dos mesmos. Embora o uso de ARCO no concreto estrutural ainda não seja difundido, inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas com o concreto com agregado reciclado (SEARA-PAZ *et al.*, 2016).

De acordo com as normas, a RILEM TC 121-DRG (1994) permite concretos com resistência à compressão de até 60 MPa, desde que o agregado seja proveniente de resíduos de concreto. A NBR 15116 (2021) permite a substituição

dos agregados naturais por agregado reciclados de concreto (ARCO) nos concretos com fins estruturais, nos teores de até 20% de substituição e nas classes de agressividade I e II da ABNT NBR 6118 (2014).

O uso de agregados reciclados ocasiona o surgimento de alguns problemas, principalmente relacionados aos aspectos de durabilidade, sendo, desta forma, geralmente mais indicado no uso de construções de estradas (ETXEBERRIA *et al.*, 2007). No entanto, Etxeberria *et al.* (2007) verifica a possibilidade do uso do concreto com agregado reciclado como material estrutural e conclui que o concreto com até 25% de agregados reciclados de concreto é adequado para uso estrutural, desde que sejam adotadas medidas apropriadas relacionadas à dosagem, resistência à compressão e durabilidade.

Reis (2009) afirma que apesar da redução das propriedades mecânicas com o uso do agregado reciclado, é viável a utilização do concreto com agregado reciclado em estruturas de concretos armado, pois mesmo com decréscimo na resistência à compressão, o concreto com ARC apresenta características e desempenho aceitáveis.

Na pesquisa desenvolvida por Xiao *et al.* (2012), na qual os mesmos apresentaram uma visão geral do estudo sobre o concreto com agregado reciclado na China, os autores concluíram que é seguro e viável aplicar concreto com ACR como material estrutural na engenharia civil. Sim e Park (2011) analisam a resistência à compressão e resistência à penetração de íons cloreto e carbonatação do concreto com agregado reciclado, e verificaram que o concreto com agregado reciclado pode ser aplicado com sucesso a membros estruturais de concreto, desde que seja utilizado um projeto adequado de mistura e método de cura.

A metodologia de projeto de mistura apropriado é o ponto inicial para a previsão completa de outros aspectos do desempenho do concreto com agregado reciclado, como as propriedades relacionadas à durabilidade e o comportamento do mesmo a longo prazo (PEPE *et al.*, 2016), como a retração e fluência.

### **2.3 RETRAÇÃO DO CONCRETO**

A retração e a fluência são fenômenos que muitas vezes são referenciados de forma conjunta, pois os mesmos possuem causas, efeitos e características

muito semelhantes, além de ocorrerem de forma simultânea no concreto (ALVES, 2017). No entanto, a deformação causada pela retração é independente do carregamento (PONS; TORRENTI, 2014), enquanto que na fluência a deformação é causada por um carregamento constante aplicado (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A retração não depende do carregamento aplicado e ocorre devido a diversos mecanismos na qual o concreto está sujeito.

### **2.3.1 Mecanismos Causadores da Retração**

O concreto é uma mistura de água, aglomerante hidráulico, agregado miúdo e gráudo, podendo conter ainda aditivos e adições. No concreto, a pasta de cimento (aglomerante e água) tem um papel determinante na retração do concreto, pois apresenta alta porosidade e uma rede de poros capilares (NUNES; FIGUEIREDO, 2007).

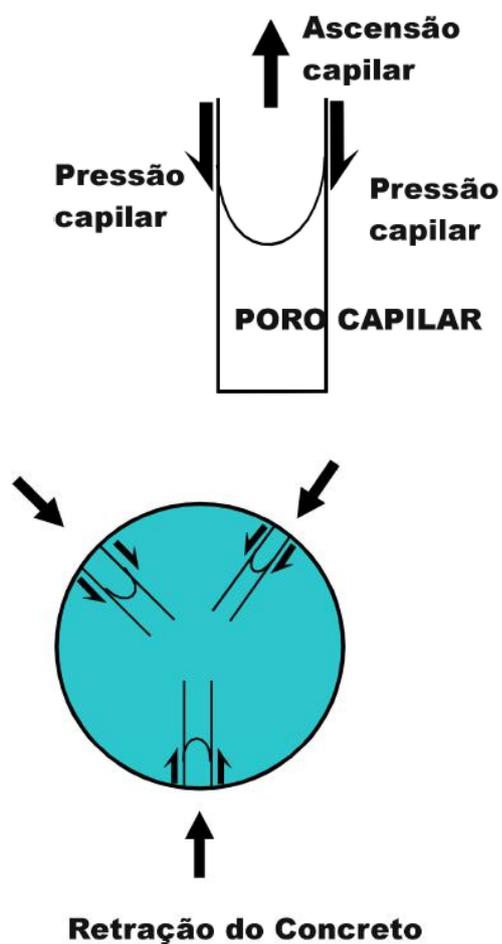
No concreto a água pode estar livre, adsorvida ou mesmo fazer parte da constituição do mesmo. O fenômeno da retração ocorre devido a movimentação da água presente no concreto, que pode ocorrer, segundo Nunes e Figueiredo (2007), devido a três mecanismos principais: mecanismo da tensão ou depressão capilar; mecanismo da pressão disjuntora ou desligamento; e mudanças na energia livre de superfície ou mecanismo da tensão superficial (BARON, 1982 *apud* HUA *et al.*, 1995). Segundo Hua *et al.* (1995), os dois últimos mecanismos estão relacionados a forças na escala de partículas coloidais e explicam a retração por secagem apenas qualitativamente. Portanto, é a variação da depressão capilar que desempenha o papel principal em comparação com outros fenômenos físico-químicos (HUA *et al.*, 1995), ou seja, o efeito capilar é a principal causa da retração (HUA *et al.*, 1997).

#### **2.3.1.1 Tensão Capilar**

A tensão capilar ocorre devido a saída de água da pasta de cimento, tendo em vista a movimentação da água nos poros capilares (NUNES; FIGUEREIDO, 2007). Admite-se a ocorrência desta percolação esteja submetida à ação de forças capilares, que devido a saída de água do concreto, induzem a tensões hi-

drostática que geram um esforço externo de compressão, ocasionando uma redução de volume (RECENA, 2014). A Figura 3 mostra a pressão capilar desenvolvida devido a tensões hidrostáticas e o efeito causado no concreto.

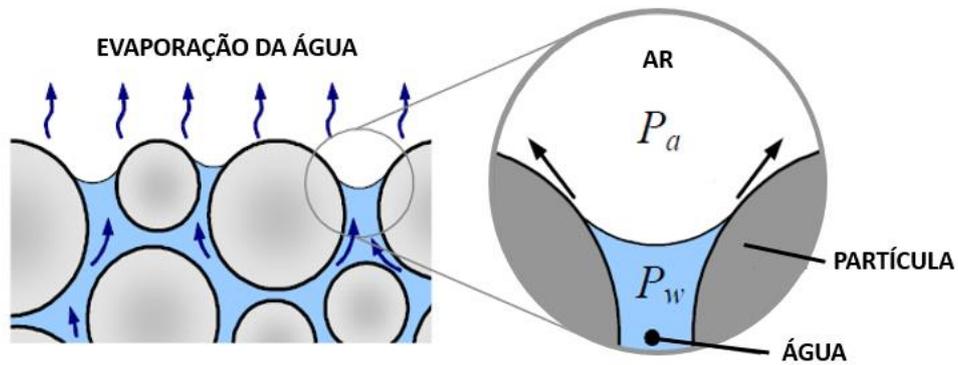
Figura 4 - Tensões hidrostáticas em meniscos capilares do concreto.



FONTE: Nunes e Figueiredo (2007).

De acordo com Nunes e Figueiredo (2007), as tensões hidrostáticas são desenvolvidas devido a um menisco formado no capilar. Esping (2007) afirma que a formação do menisco ocorre quando o concreto seca devido a evaporação que ocorre quando a taxa de evaporação excede a taxa de água livre interna, transportando água para a superfície. Assim, ocorre a formação de numerosos meniscos entre as partículas na superfície do concreto (ESPING, 2007), este fenômeno é exposto na Figura 5.

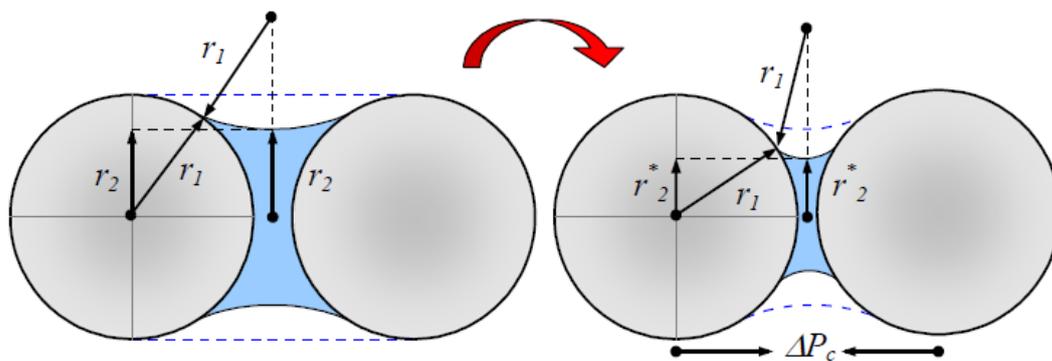
Figura 5 – Formação de meniscos entre partículas na superfície devido à evaporação.



FONTE: Adaptado de Esping (2007).

Recena (2014) afirma que este fenômeno é crescente com o tempo, pois a água evapora de canais cada vez menores, na qual a tensão capilar ocorre com mais intensidade. Nunes e Figueiredo (2007) afirmam que quando menor o raio do menisco, maior é a pressão capilar. Segundo Esping (2007), as forças capilares possuem uma relação inversa ao raio do menisco, e consequentemente, a tensão capilar aumenta com a diminuição dos poros entre as partículas, a Figura 6 ilustra esse fenômeno.

Figura 6 - Representação do líquido entre duas partículas esféricas na superfície.

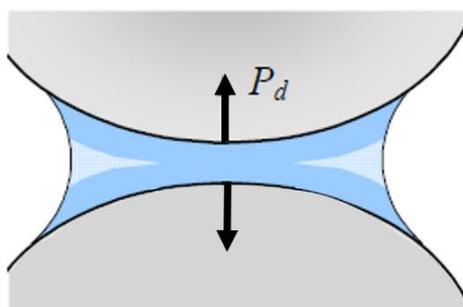


FONTE: Modificado de Esping (2007).

### 2.3.1.2 Pressão de Desligamento

No mecanismo de pressão de desligamento ou pressão de separação, além de formar o menisco, no mesmo poro capilar admite-se que existe superfícies sólidas muito mais próximas do que o permitido pela teoria de depressão capilar (BALTHAR, 2004), na qual a água fica adsorvida nos espaços estreitos na superfície das partículas de C-S-H para todas as umidades relativas (ESPING, 2007). No entanto, esse mecanismo é significativo para umidades relativas acima de 50% (NUNES; FIGUEREIDO, 2007), pois a espessura do filme de água adsorvido aumenta com a elevação da umidade relativa, desta forma, a adsorção de moléculas de água induz pressão disjuntora e causa separação entre as superfícies (ESPING, 2007), conforme exposto na Figura 7. Balthar (2004) afirma que nestas superfícies existem camadas de água adsorvida que provocam uma tensão normal impedindo que as mesmas se aproximem, essa tensão é denominada também de pressão de separação ou desligamento.

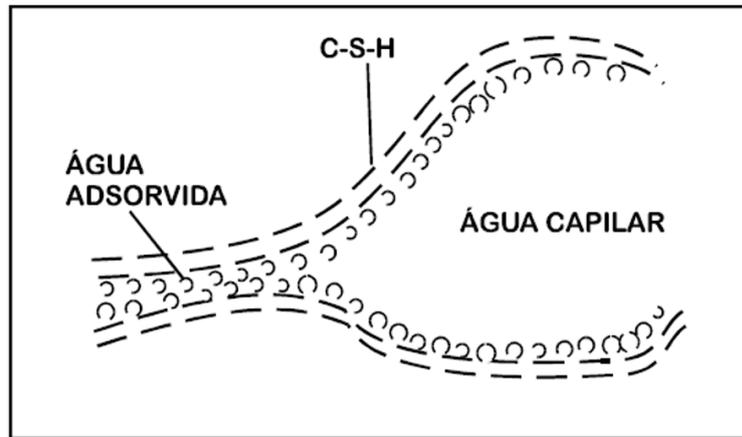
Figura 7 - Representação da pressão de disjuntora.



FONTE: Modificado de Esping (2007).

Recena (2014) afirma que na teoria da adsorção superficial considera-se que a água adsorvida nos poros da pasta, enquanto presente no mesmo, promove o afastamento entre as partículas. A adsorção de água ocorre nos cristais de C-S-H e cria uma pressão de separação, na medida que aumenta a espessura da camada de água adsorvida, a pressão de desligamento aumenta (NUNES; FIGUEIREDO, 2007). A Figura 8 ilustra a presença de água adsorvida entre os cristais de C-S-H.

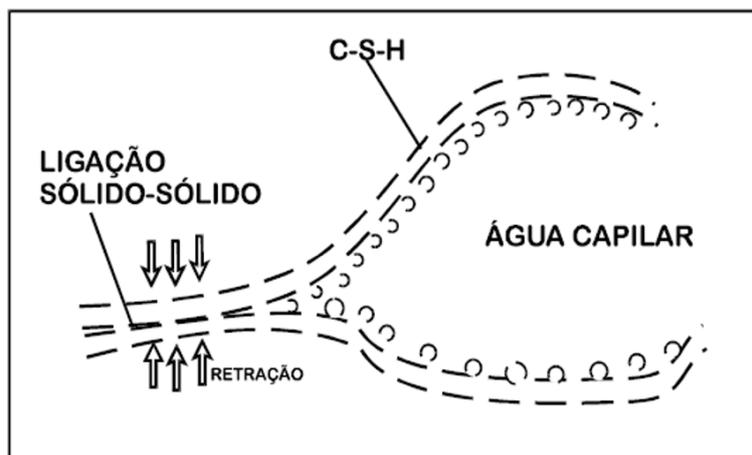
Figura 8 - Presença de água adsorvida entre cristais de C-S-H.



FONTE: Feldman e Sereda (1970) *apud* Nunes e Figueiredo (2007).

No entanto, se houver o consumo dessa água adsorvida, ocorre a redução da pressão de separação, e conseqüentemente, a diminuição da espessura das camadas, ou seja, do espaço existente entre as partículas, caracterizando o fenômeno de retração (BALTHAR, 2004; RECENA, 2014). Conseqüentemente, quando o sistema seca e a umidade relativa é reduzida, as partículas irão se contrair (ESPING, 2007). A Figura 9 mostra a ligação sólido-sólido entre os cristais de C-S-H após a saída de água.

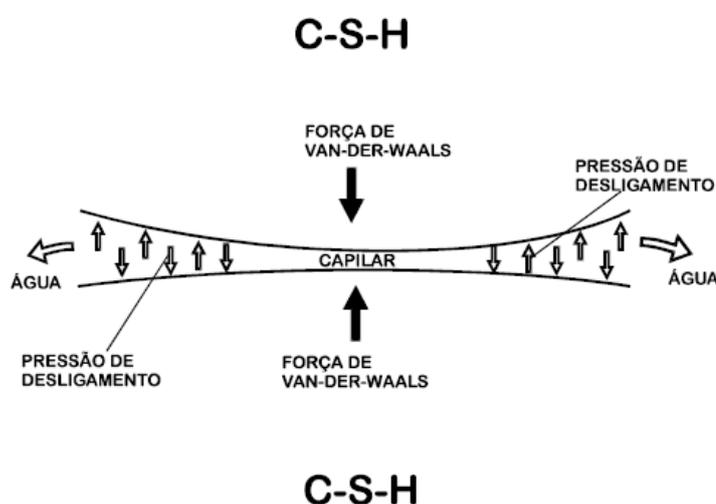
Figura 9 - Ligação sólido-sólido entre cristais de C-S-H.



FONTE: Feldman e Sereda (1970) *apud* Nunes e Figueiredo (2007).

De acordo com Nunes e Figueiredo (2007), com a perda de água, o filme de água adsorvida vai diminuindo de espessura e a pressão de desligamento também, sendo assim, as partículas de C-S-H são atraídas entre si pelas forças de Van der Waals, ocorrendo a contração volumétrica da estrutura. A Figura 10 apresenta um esquema ilustrando a diminuição da pressão de desligamento entre os cristais de C-S-H e Força de Van Der Waals atraindo as camadas de C-S-H.

Figura 10 - Pressão de desligamento e Força de Van Der Waals.



FONTE: Nunes e Figueiredo (2007).

A teoria da tensão capilar e da adsorção superficial da água não são excludentes e explicam o fenômeno da retração, o mais adequado é supor a coexistência dos dois mecanismos ocorrendo de forma simultânea (RECENA, 2014). Segundo Recena (2014), a teoria da tensão capilar permite um melhor entendimento do comportamento do concreto no estado fresco, e a teoria da adsorção superficial é mais precisa para entender o comportamento do concreto no estado endurecido.

### 2.3.1.3 Tensão Superficial

A retração causada pelo mecanismo de variação da tensão superficial é resultante do desequilíbrio de forças na interface entre um material sólido e

outro líquido ocasionando tensões de compressão no sólido e aproximação das partículas (BALTHAR, 2004). Segundo Nunes e Figueiredo (2007), abaixo dos 40% de umidade relativa não há pressão de separação e nem tensões capilares, e a retração é explicada por mudanças na energia de superfície dos sólidos com alta área superficial.

O C-S-H possui energia superficial elevada, e conseqüentemente, alta tensão superficial que provoca pressão sobre a superfície sólida, de forma semelhante à pressão exercida sobre uma gota de água devido à tensão superficial (NUNES E FIGUEIREDO (2007). Nunes e Figueiredo (2007) afirmam que a presença de água adsorvida nos cristais de C-S-H diminui a energia livre, e conseqüentemente, reduz a tensão superficial e a pressão exercida sobre o sólido. Entretanto, neste mecanismo não existe pressão de desligamento, e conseqüentemente, a alta tensão superficial provoca a retração do concreto.

### **2.3.2 Fenômeno da Retração**

A retração no concreto é um fenômeno dependente do tempo, que pode ser definido como o aumento da deformação ao longo do tempo, com redução do volume do elemento de concreto sem ação de cargas à temperatura constante (GILBERT; RANZI, 2011; AL-SALEH, 2014; ACI 209). Segundo Al-Saleh (2014), a principal causa dessa deformação é a perda de água durante o processo de secagem do concreto. No entanto, essas deformações também ocorrem quando nenhuma transferência de umidade é permitida com o meio externo, sendo atribuída a reações químicas e mudanças estruturais internas (HOLT, 2005).

A retração pode ser dividida em retração plástica, química e autógena, térmica, por secagem ou hidráulica e por carbonatação. A retração plástica ocorre no concreto ainda no estado fresco, enquanto as outras ocorrem no estado endurecido (GILBERT; RANZI, 2011).

#### **2.3.2.1 Retração Plástica**

A retração plástica é uma alteração dimensional que ocorre nos materiais à base de cimento fresco nas primeiras horas, quando a mistura ainda é plástica e não tem resistência significativa (TOLEDO FILHO *et al.*, 2005). Deve-se notar

que a retração plástica se desenvolve no concreto no estado plástico, o que significa que não ocorre nenhuma reação química significativa entre o cimento e a água (SAYAHI *et al.*, 2017).

De acordo com Silva *et al.* (2015a), enquanto o concreto ainda está no estado plástico, pode ocorrer a perda de água por evaporação da superfície do concreto ou por sucção do concreto seco abaixo. Segundo Pelisser *et al.* (2010), a redução do volume na retração plástica é decorrente dessa perda de água da pasta de cimento, antes do processo de cura ocorrer e enquanto as partículas sólidas ainda podem se mover dentro da pasta. De acordo com Helene e Andrade (2010), na retração plástica a perda de água pode ocorrer além da evaporação, por exsudação, percolação por juntas dos moldes, absorção de água pelos agregados, absorção de água pelas fôrmas ou por alguma superfície de contato com a peça concretada.

A evaporação da água proporciona a formação de meniscos côncavos na superfície do concreto fresco, estes meniscos causam a consolidação do concreto e o desenvolvimento da tensão de tração na superfície do mesmo, ocasionando o surgimento de fissuração (LURA *et al.*, 2007). Devido a isso, ocorre uma contração na superfície do concreto denominada de retração plástica que é proporcional à taxa de evaporação/sucção da água (SILVA *et al.*, 2015a), na qual supõem-se que a fissuração se desenvolve por retração plástica quando a taxa de evaporação excede a taxa na qual a água é fornecida à superfície (PELISSER *et al.*, 2010).

A taxa de evaporação é dependente da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura do concreto (SILVA *et al.*, 2015a). De acordo com Esping (2007), os fatores ambientais que ocasionam antecipadamente a fissuração por retração são a velocidade do vento, temperatura do ar, radiação solar e umidade relativa. Estes fatores, juntamente com a temperatura do concreto, regulam a taxa de evaporação do concreto, que não deve exceder a  $1,0 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{h}$  pois existe um risco significativo de fissuração do concreto (ESPING, 2007). No entanto, fissuras também podem surgir para taxas de evaporação inferiores a  $0,5 \text{ kg} / \text{m}^2 / \text{h}$  (ESPING, 2007).

A fissuração por retração plástica é geralmente descrita como as fissuras que se formam entre o momento em que o concreto é lançado até a formação

do conjunto final (LURA *et al.*, 2007). No entanto, nem o conjunto inicial e nem o final pode ser declarado com um estado físico distinto e bem definido, sendo somente uma mudança gradual da estrutura devido ao processo de hidratação (ESPING, 2007).

De acordo com Esping (2007), o conjunto final é determinado de forma arbitrária, através de métodos empíricos, assim como o período de retração plástica. Entretanto, o período de retração plástica, é muitas vezes dado em termos gerais, por exemplo 12 ou 24h (ESPING, 2007). Dentre os métodos que são utilizados para a determinação do ajuste inicial e final, existe o de resistência à penetração (ASTM C403/C403M – 16) e a ABNT NBR NM 65 (Cimento Portland - Determinação do tempo de pega).

A fissuração por retração é uma interação complexa entre fenômenos internos e externos, devido a vários mecanismos de deformação sobrepostos que são ocasionados pela saída de água (ESPING, 2007; MORA-RUACHO, 2009). Com isso há a formação de uma rede de meniscos capilares que exercem forças de contração dentro da microestrutura, provocando a contração volumétrica da pasta de cimento (ESPING, 2007; MORA-RUACHO, 2009; NUNES; FIGUEIREIDO, 2007; TOLEDO FILHO *et al.*, 2005). Uma vez restringida essa deformação, seja pelos agregados de grandes dimensões ou pela armadura ou qualquer outro fator, provocam-se tensões de tração e conseqüentemente o aparecimento de fissuras superficiais (NUNES; FIGUEREIDO, 2007).

Uma mistura muito fluída com um elevado teor de água, embora tendo o potencial para uma maior contração volumétrica do que uma mistura com menor teor de água, pode apresentar pouca ou nenhuma fissuração por retração plástica (PELISSER *et al.*, 2010). Segundo Pelisser *et al.* (2010), o concreto fluído pode permanecer suficientemente móvel para permitir a acomodação de mudanças de volume para determinadas condições de evaporação.

A fissuração por retração plástica se desenvolve quando o concreto fresco é exposto a altas taxas de evaporação, principalmente, em elementos de concreto com grandes relações de área de superfície / volume, como pavimentos e lajes (MORA-RUACHO, 2009; SAYAHI *et al.*, 2017). De acordo com Sayahi *et al.* (2017), as fissuras iniciam-se na superfície do concreto e muitas vezes se propagam para o interior, aumentando a permeabilidade do concreto e facilitando a

entrada de agentes agressores, afetando além da estética, a durabilidade dos elementos de concreto.

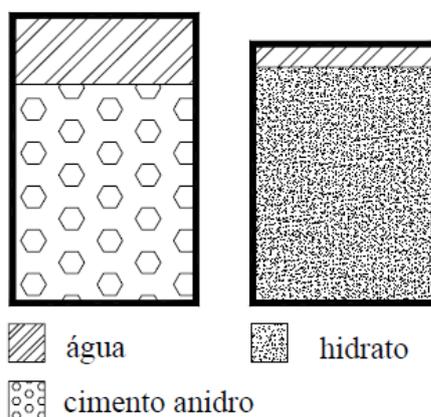
Segundo Gilbert e Ranzi (2011), a retração plástica pode resultar em fissuras significativas, pois nesse estágio, a ligação entre o concreto plástico e a armadura ainda não foi desenvolvida, e o aço é ineficaz no controle dessas fissuras. Sendo assim, a retração plástica pode ocasionar fissuras prematuras na superfície do concreto antes de seu endurecimento (SAYAHÍ *et al.*, 2017). Desta forma, é melhor prevenir a sua ocorrência tomando medidas adequadas para evitar a evaporação rápida da água e a ocorrência das fissuras (GILBERT; RANZI, 2011). As fissuras podem ser eliminadas através de medidas preventivas que impossibilitem a migração da água para a superfície da estrutura (TAVARES, 2008), visto que a perda de água por evaporação é uma das principais causas da retração plástica (TOLEDO FILHO *et al.*, 2005), então, deve-se controlar os fatores que influenciam na taxa de evaporação (NUNES; FIGUEREIDO, 2007).

De acordo com Esping (2007), muitas vezes é difícil distinguir entre as fissuras por retração plástica e fissuras causadas por dilatação térmica, deslocamento vertical (assentamento), ou retração autógena. Geralmente, as fissuras causadas devido à retração autógena se desenvolvem uniformemente no elemento de concreto, enquanto as fissuras por evaporação são iniciadas na superfície externa progredindo para o interior do concreto (ESPING, 2007).

#### 2.3.2.2 Retração Química e Autógena

De acordo com Esping (2007), a retração química é também denominada de contração *Le Chatelier*. Segundo Balthar (2004) e Bentur (2002), contração de *Le Chatelier* é a retração decorrente do volume de hidratos formados serem inferior à soma dos seus constituintes. Essa contração ocorre quando o concreto está no estado fresco, na qual a redução de volume ocorre na direção da gravidade (BALTHAR, 2004), conforme esquema da Figura 11.

Figura 11 - Representação da contração *Le Chatelier*.



FONTE: Balthar (2004).

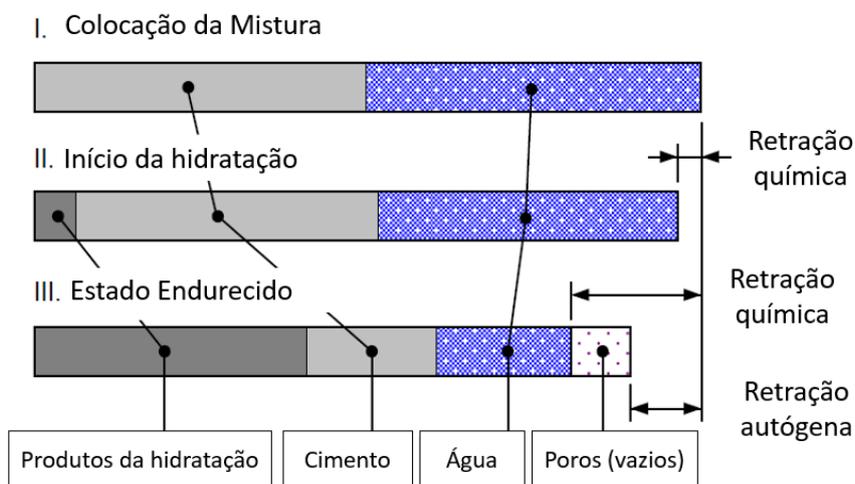
Esping (2007) afirma que a retração química é resultante das reações entre cimento e água, que levam a uma redução de volume, na qual as reações pozolânicas também são consideradas (BENTUR, 2002). A retração química inicia imediatamente quando se mistura o cimento e água, sendo que a taxa de endurecimento é maior durante as primeiras horas (ESPING, 2007). De acordo com Bentur (2002), a retração química ocorre no estágio na qual o concreto está fluido, e começa a torna-se um sólido visco-elástico, ou seja, aproximadamente no tempo de endurecimento do concreto.

Muitas vezes verifica-se na literatura que a retração química é chamada também de retração autógena. Conforme definição de Gilbert e Ranzi (2011), a retração autógena é denominada como retração química, e ocorre nos primeiros dias, ou mesmo semanas, devido às reações químicas próprias da hidratação do cimento, estando relacionada ao grau de hidratação do cimento em um elemento isolado, sem troca de umidade com o ambiente envolvente. Segundo Esping (2007), enquanto o concreto está fluído, a retração autógena é considerada igual à retração química.

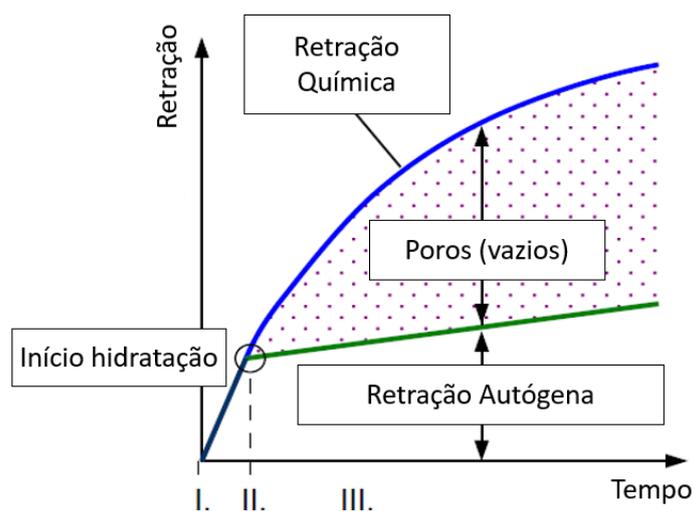
De acordo Tazawa (1997), a retração autógena é decorrente da redução macroscópica de volume de concreto no estado endurecido, causada pela hidratação do cimento, sem a ação de carga externa, variação de umidade e temperatura. No entanto, Esping (2007) afirma que não existe um consenso se a retração autógena deve ser referida ao período total de endurecimento, ou a partir do

período em estado sólido. Sugere-se que a medição da retração autógena deva ser iniciada assim que possível após a mistura dos componentes do concreto (ESPING, 2007), sendo a retração autógena definida como a deformação externa para um sistema isolado. A Figura 12 (a) e (b) apresenta o princípio da retração autógena e química para uma pasta de cimento sob condições seladas.

Figura 12 - Princípio da retração autógena e química.



(a) Retração: Fases I, II e III e composição do concreto.



(b) Desenvolvimento da retração ao longo do tempo para cada fase (I, II e III).

FONTE: Modificado de Esping (2007).

Na Figura 12 observa-se o comportamento da pasta de cimento ao longo do tempo, indicando as fases I, II e III e a deformação referente a cada uma delas. A fase I é referente a colocação das misturas, nesta fase a mistura encontra-se fluída e observa-se o volume de água e cimento na Figura 12 (a). No entanto, as reações químicas já ocorrem, mas não de forma significativa, pois o concreto encontra-se no estado fresco, e considera-se nesta fase que a retração química é equivalente a autógena. Na fase II, ocorre a formação dos produtos de hidratação e é possível verificar a retração química, e posteriormente, a formação de vazios devido ao início do endurecimento do concreto, possibilitando identificar a retração autógena (fase III).

A retração autógena do concreto é a deformação sem restrições que ocorre quando o concreto é mantido selado e a uma temperatura constante (BENTZ; JENSEN, 2004). Segundo Holt (2005) a retração autógena é definida como a alteração do volume macroscópico ocorrendo sem troca de umidade com o ambiente externo envolvente. A retração autógena pode ser causada por mecanismos diferentes, mas o mais comum se origina no fato de que os produtos de hidratação (hidratos), formados pela hidratação do cimento Portland, ocupam menos espaço do que a água e o cimento anidro (BENTZ; JENSEN, 2004), essa redução é na ordem de 20% (PONS; TORRENTI, 2014).

Em geral, a parcela da retração que não engloba alteração de volume devido à perda ou inclusão de substâncias, variação de temperatura e aplicação de carga e restrição externas são consideradas retração autógena, sendo denominado também de retração por auto dessecação (WU *et al.*, 2017). De acordo com Wu *et al.* (2017) a retração autógena é uma redução de volume inevitável devido à auto dessecação do concreto, especialmente para baixa relação água/cimento.

A retração por auto secagem, é um fenômeno que se inicia pós- pega e encerra depois de finalizada a hidratação do cimento (BALTHAR, 2004) e a retração autógena é muitas vezes associada a esse fenômeno (WU *et al.*, 2017), que é um processo de secagem localizado, resultante da diminuição da umidade através da hidratação do cimento (JI *et al.*, 2015).

O fenômeno de auto secagem representa à redução de água livre dos poros da matriz cimentícias, removendo a água dos poros capilares, pois a mesma

tende a migrar para participar da reação de hidratação, ou para adsorver-se na superfície dos recém-formados hidratos de C-S-H (BALTHAR, 2004; TAKAOCA, 2010). Ocorre assim, um esvaziamento sucessivo da estrutura de poros e leva a tensões de tração na água dos poros através da formação de meniscos.

A formação do menisco faz com que a umidade relativa caia e a auto dessecação ocorra na pasta de cimento (BENTZ; JENSEN, 2004). Desta forma, os meniscos (interface água/ar nos poros) cujos esforços resultantes da tensão superficial provocam tensões capilares altas no interior dos poros, ocasionam a aproximação das partículas de cimento hidratado, induzindo assim à retração autógena (SILVA, 2005; BALTHAR, 2004). O resultado é um encolhimento do concreto endurecido, ocasionando fissuras globais ou locais na superfície do concreto (BENTZ; JENSEN, 2004).

A retração autógena é uma preocupação em concreto de alta resistência ou alto desempenho, pois nestes concretos há uma baixa relação água/cimento (HOLT, 2005), devido a isso ocorre a auto dessecação que induzirá a retração autógena de forma acentuada, aumentando o risco de fissuras nas estruturas de concreto (SHEN *et al.*, 2016). É importante destacar que a contração volumétrica dos sólidos durante a hidratação do cimento só deve estar relacionada à retração autógena devido à auto secagem, se não houver a influência externa (SILVA, 2005).

Muitos concretos tendem a desenvolver a retração autógena devido à utilização de substâncias químicas, baixo teor de água e alto teor de material aglutinante, por exemplo, o concreto de alta resistência e o concreto autoadensável (ESPING, 2007).

#### 2.3.2.3 Retração Térmica

A retração térmica é decorrente da reação exotérmica e ocorre geralmente em elementos com grande volume de concreto devido à variação de temperatura do concreto, nos elementos estruturais de pequena dimensão tem pouca influência (PONS; TORRENTI, 2014). A reação exotérmica é proveniente da própria hidratação do concreto, e ocorre nas primeiras horas ou dias, após iniciar a hidratação da pasta de cimento à medida que o calor da hidratação se dissipa gradualmente (GILBERT; RANZI, 2011).

De acordo com Kovler e Zhutovsky (2006), geralmente, os principais fatores que influenciam a temperatura e, conseqüentemente, o desenvolvimento da retração térmica são: a proporção dos compostos do Cimento Portland; superfície específica do cimento; a temperatura inicial do concreto; a temperatura ambiente durante o progresso da hidratação e a massa e a forma do elemento de concreto.

A retração térmica pode desenvolver após a ocorrência do pico de evolução da temperatura, por acúmulo de calor de hidratação ou ao ser submetido a aquecimento por uma fonte externa de calor (BALTHAR, 2004). A deformação ocorre quando o concreto quente é resfriado à temperatura ambiente (TAVARES, 2008). Tanto a retração térmica quanto a retração química não estão associadas ao processo de perda de água da pasta de cimento, e a soma das deformações ocasionadas pelas mesmas é denominada deformação por retração endógena (GILBERT; RANZI, 2011).

#### 2.3.2.4 Retração por Secagem

A retração por secagem é ocasionada pela baixa umidade relativa entre o ambiente externo e os materiais à base de cimento, causando a evaporação da água livre armazenada nos poros capilares da pasta de cimento (TOLEDO FILHO *et al.*, 2005; GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA, 2016), sendo esse um dos motivos mais comuns de variação dimensional dos concretos (BENTZ; JENSEN, 2004; VINKLER; VÍTEK, 2017).

De acordo com Medjigbodo *et al.* (2018), a variação dimensional dos concretos é desencadeada pela redução da umidade relativa nos poros da pasta de cimento, este gradiente de umidade relativa no concreto afeta a distribuição de saturação de água no mesmo ocasionando efeitos estruturais. A parte externa seca primeiro, assim as tensões de tração são geradas próximas à superfície, enquanto o núcleo da amostra está em compressão (MEDJIGBODO *et al.*, 2018), ocasionando, assim, fissuras na superfície do concreto.

Desta forma, a retração por secagem gera uma tensão interna, além de perda de massa, ocasionando uma redução de volume do concreto (GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA, 2016). Bazant (2001) afirma que é comumente aceito que a retração por secagem é causada por tensão capilar, tensão

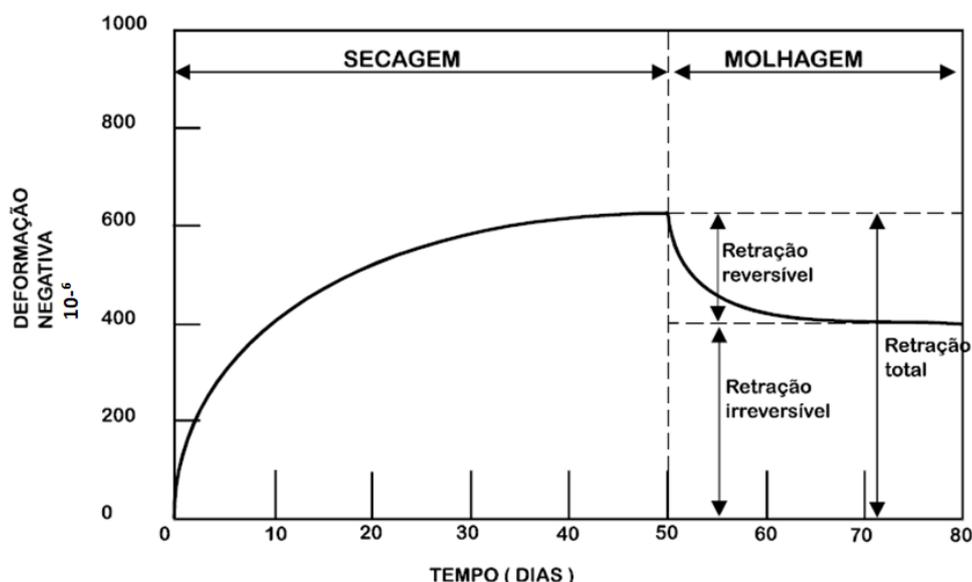
na superfície do sólido e retirada de água adsorvida e de água entre as camadas do gel de cimento.

A exposição dos elementos de concreto não restringido ao ambiente de baixa umidade relativa, ocasiona a retração por secagem que aumenta ao longo do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os elementos estruturais que têm seus movimentos restringidos em condições de baixa umidade relativa do ar não possuem liberdade para mover-se e tensões de tração surgem dentro dos elementos de concreto (TAVARES, 2008; AL-SALEH, 2014).

No concreto armado, a própria armadura do concreto, conexões entre os elementos estruturais e outras partes da estrutura fornecem restrições à retração por secagem, ocasionando, assim, tensões de tração dentro dos elementos de concreto (GILBERT, RANZI; 2011; AL-SALEH, 2014; NUNES; FIGUEREIDO, 2007). Desta forma, se o elemento tem as deformações restringidas, à retração por secagem é responsável pelo surgimento de fissuras nas estruturas de concreto. O concreto apresenta baixa resistência à tração, desta forma, as tensões devido as restrições podem ocasionar o surgimento de fissuras no concreto (GILBERT, RANZI; 2011; AL-SALEH, 2014).

As deformações por retração são parcialmente revertidas, na qual possui uma parcela reversível e outra irreversível, isto é observado na Figura 13.

Figura 13 - Reversibilidade da retração por secagem.



FONTE: Mindess e Young (1981) *apud* Mehta e Monteiro (2014).

Verifica-se através de ciclos de secagem-molhagem, que após a molhagem do concreto ocorre uma restituição de parte das deformações (parcela reversível). Mehta e Monteiro (2014) atribuem a retração por secagem irreversível decorrente, provavelmente, do desenvolvimento de ligações químicas dentro da estrutura do C-S-H devido à secagem. É importante destacar que a retração por secagem está principalmente relacionada com a remoção da água adsorvida da pasta de cimento (NUNES; FIGUEREIDO, 2007).

#### 2.3.2.5 Retração por Carbonatação

A retração por carbonatação é decorrente da ação do CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) com compostos hidratados do cimento na presença de umidade (SILVA, 2005; TAVARES, 2008), causando a carbonatação do concreto (WU *et al.*, 2017).

A carbonatação é o processo físico-químico de reação entre o gás carbônico presente na atmosfera e os compostos da pasta de cimento hidratada (MIETZ, 1998), saturada principalmente de hidróxido de cálcio e outros compostos alcalinos, como, o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH). Neste processo, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente na atmosfera penetra no interior do concreto por difusão, reagindo com a água presente nos poros e formando o ácido carbônico. O ácido carbônico reage com a portlandita [Ca(OH)<sub>2</sub>] formada na hidratação do cimento, resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). A carbonatação ocorre, principalmente, em áreas urbanas, que usualmente possuem grande quantidade de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) emitidos por veículos e parques industriais (GONZÁLEZ *et al.*, 2011).

O concreto quando exposto a carbonatação perde água, comportando-se como se tivesse exposto a uma umidade relativa mais baixa (NUNES; FIGUEREIDO, 2007). Além disso, a redução da concentração de Ca (OH)<sub>2</sub>, a baixa integridade da C-S-H, e a perda de umidade podem desencadear a retração por carbonatação (WU *et al.*, 2017).

Além disso, a sequência da secagem e carbonatação afetam o valor final da retração. Se a carbonatação e secagem ocorrem simultaneamente à retração

é menor do que quando ocorre inicialmente a secagem e posteriormente a carbonatação (TAVARES, 2008). Nos ciclos de molhagem e secagem alternadas em atmosferas contendo gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), a retração por carbonatação é mais evidente, sendo maior do que quando é feita em atmosfera isenta de  $\text{CO}_2$ , de modo que a retração por carbonatação aumenta a parcela de retração irreversível, contribuindo para fissuração superficial generalizada do concreto (TAVARES, 2008).

Apesar dos diferentes tipos de retração, na prática é difícil isolar cada tipo, pois os mesmos ocorrem simultaneamente, porém com duração diferente ao longo do tempo (SILVA, 2005). Segundo Gilbert e Ranzi (2011), embora a retração por secagem e a endógena sejam bastante diferentes na natureza, não há necessidade de distingui-los do ponto de vista da engenharia estrutural. Em estruturas reais de concreto, a hidratação do cimento e a secagem da superfície ocorrem simultaneamente, no entanto, normalmente a retração autógena e a por secagem são investigados separadamente e, portanto, a maioria dos trabalhos de pesquisa relacionados com a retração é focada em retração autógena ou por secagem (ZHANG *et al.*, 2012).

### **2.3.3 Fatores que influenciam a retração**

A retração do concreto é um fenômeno complexo afetado por inúmeros fatores, particularmente a composição do concreto, o tamanho da amostra, as condições ambientais como a temperatura e umidade locais (VINKLER; VÍTEK, 2017). Segundo Wu *et al.* (2017), são fatores que influenciam a retração: cimento (composição e finura), a presença de materiais cimentícios suplementares (sílica ativa, escória, cinza volante), relação água/aglomerante, os agregados, o uso de fibras (fibra de aço, sintéticas, de celulose) e o uso de aditivos químicos (agentes redutores de água, agentes redutores de contração, agentes expansivos). Além disso, fatores como grau de hidratação e a geometria da peça de concreto também afetam a retração (TAKAOCA, 2010).

Segundo Medjigbodo *et al.*, (2018), a retração por secagem é a deformação mais significativa nos concretos normais, sendo a principal componente da retração (SEARA-PAZ *et al.*, 2016). Os movimentos da água na pasta de cimento controlam a retração por secagem, e esses são influenciados por vários fatores

que interagem juntos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dentre os fatores que afetam a retração por secagem, Mehta e Monteiro (2014) citam: os materiais utilizados e as dosagens; tempo e umidade; geometria do elemento de concreto.

A retração por secagem é afetada por todos os fatores que afetam a secagem do concreto, incluindo as características da mistura (tipo e quantidade do aglomerante, o teor de água e a relação água/cimento, quantidade de agregado, a razão entre agregado fino e grosso, tipo de agregado, tamanho do agregado, uso de aditivos e adições), efeito do ambiente (umidade relativa, temperatura), além do efeito do projeto e construção (período de cura, tamanho e forma do elemento de concreto) (GILBERT; RANZI, 2011; ACI 209). Mantendo-se todos os fatores iguais, a retração por secagem aumenta quando a relação água/cimento aumenta, a umidade relativa diminui e a razão entre a área de superfície exposta e o volume aumenta. Os aumentos de temperatura aceleram a secagem e, portanto, aumentam a retração (GILBERT; RANZI, 2011).

A retração também é afetada pelo volume e tipo de agregado, pois o agregado fornece contenção ao encolhimento da pasta de cimento, de modo que um aumento na quantidade de agregado reduz a retração (GILBERT, RANZI; 2011). A retração também é menor quando usados agregados mais duros, ou seja, agregados com módulo de elasticidade maiores, sendo assim, a retração é consideravelmente maior no concreto leve do que no concreto com peso normal (GILBERT, RANZI; 2011).

As condições de ensaio da retração também possuem influência nos resultados da retração, desta forma, deve-se haver uma padronização para realização do mesmo, devendo ter controle da umidade relativa e temperatura, bem como um padrão na forma e dimensões dos corpos de prova e no processo de cura. Atualmente existem diversas recomendações, como a ASTM 157/C 157M – 08 (*Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*) e a ASTM C596-18 (*Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement*), para a retração por secagem.

Manzi *et al.* (2013) realizou o ensaio de retração por secagem com amostras de concreto cilíndricas, com diâmetro de 12 cm e altura de 24 cm, iniciando o teste de retração 2 dias após a moldagem. A variação longitudinal de deformação com o tempo de cada cilindro foi medida usando *strain gages* conectados a

um sistema de aquisição digital (MANZI *et al.*, 2013). Já Medjigbodo *et al.* (2018) utilizou amostras prismáticas, dimensões 7x7x28 cm, iniciando a primeira leitura com 1 dia, durante 90 dias, usando sensores de LVDT. Seara-Paz *et al.* (2016) utilizou amostras prismáticas, dimensões 15x15x60 cm, na qual a deformação foi medida usando um extensômetro embutido no centro desses espécimes ligadas a um sistema de aquisição de dados e as leituras foram iniciadas após 24h e monitoradas continuamente.

Lotfy e Al-Fayez (2015) realizaram os ensaios de retração de acordo com ASTM C157 em prismas de concreto nas dimensões de 7,5 x7,5 x28,5 cm. Tam *et al.* (2015) também analisou amostras prismáticas de 7,5 x7,5 x28,5 cm, que foram desmoldadas após 24 h de mistura e imediatamente colocadas em ambiente de temperatura e umidade controlados. Os ensaios realizados por Pedro *et al.* (2017) e Pedro *et al.* (2014) foram de acordo com as especificações LNEC E-398 (*Concrete: Determination of drying shrinkage and expansion*), utilizando espécimes de 15x15x 60 cm submetidos a condições controladas de temperatura e umidade. Fathifazl *et al.* (2011) seguindo o procedimento da norma ASTM C157 utilizaram corpos de prova prismáticos de 10x10x28,5 cm.

As condições de ensaio de Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016) seguem a ASTM C596, na qual utilizaram amostras prismáticas de 7x7x28,5 cm. Os espécimes foram cobertos com uma estopa úmida e uma folha de plástico durante as primeiras 24 h antes da remoção dos moldes, posteriormente, foram curados sob a água por um período adicional de 48 h. Após três dias, os espécimes foram removidos do tanque de água e limpos com um pano úmido iniciando-se as leituras, logo após as leituras iniciais os espécimes foram colocados em uma sala com temperatura e umidade controladas (GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA, 2016).

Na Tabela 9 estão expostas de forma resumida algumas condições do ensaio de retração encontradas na literatura.

Tabela 9 - Condições do ensaio de retração.

<b>Autores</b>	<b>Umidade Relativa (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Duração (dias)</b>
Manzi <i>et al.</i> (2013)	60	20 ± 1	> 365
Medjigbodo <i>et al.</i> (2018)	50 ± 5	20 ± 2	90

<b>Autores</b>	<b>Umidade Relativa (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Duração (dias)</b>
Seara-Paz <i>et al.</i> (2016)	75	15	1000
Lotfy e Al-Fayez (2015)	50 ± 4	23 ± 2	77
Tam <i>et al.</i> (2015)	70 ± 2	22 ± 2	245
Pedro <i>et al.</i> (2014)	60	20	91
Fathifazl <i>et al.</i> (2011)	50 ± 4	23 ± 2	225
Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016)	50 ± 5	23 ± 2	360

FONTE: Autora (2022).

De acordo com a literatura percebe-se que existe uma diferença na padronização adotada nos trabalhos, havendo variação nas dimensões da amostra e sobretudo na umidade relativa (Tabela 9), o que dificulta a comparação entre os resultados experimentais encontrados.

#### **2.3.4 Efeitos da retração no concreto**

O concreto independente da sua composição está sujeito a sofrer variações dimensionais ao longo do tempo, como a retração (ORDÓÑEZ, 2013). As deformações resultantes da retração e, dependendo do grau de restrição da estrutura, ocasionam tensões que resultam no surgimento de fissuras (ONGHERO, 2017). Devido à baixa resistência do concreto à tração, sobretudo nas primeiras idades, pequenas deformações no concreto podem ocasionar tensões suficientes para iniciar a formação e propagação de fissuras (NUNES; FIGUEIREDO, 2007). Segundo Gilbert e Ranzi (2011), logo após o início da secagem, as tensões de tração perto das superfícies de secagem podem superar a resistência à tração do concreto, principalmente no concreto com cura inadequada, resultando em fissuras na superfície.

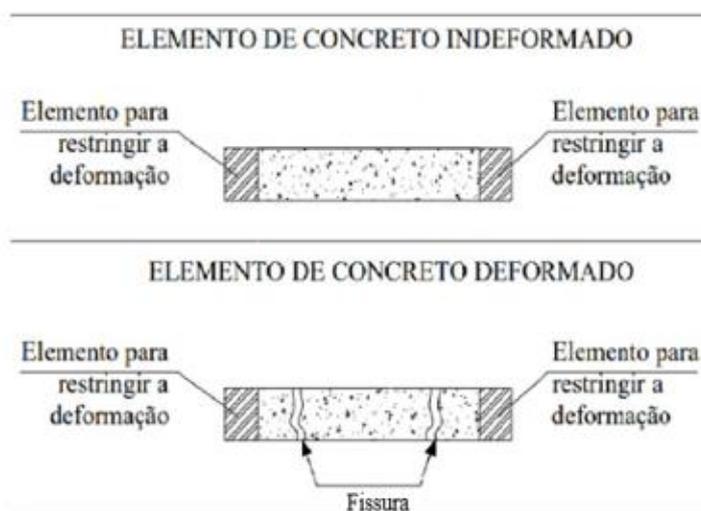
Os elementos de superfície, por apresentarem uma dimensão pequena em relação às demais, são mais suscetíveis aos efeitos da retração. A fissuração causada pela retração é uma grande preocupação, particularmente em estruturas com uma alta área superficial em relação ao volume (RAHMANI *et al.*, 2012).

A retração é um dos principais mecanismos que levam à formação inicial de fissuras em estruturas de concreto, essas fissuras reduzem a capacidade de carga das estruturas e, além disso, afetam a durabilidade (ZHANG *et al.*, 2012;

VINKLER; VÍTEK, 2017). De acordo com Yoo *et al.* (2015) essas fissuras ocasionadas devido à retração são as principais causas de preocupação com relação a durabilidade. O fenômeno da retração diminui a durabilidade das estruturas de concreto armado, pois com o surgimento de fissuras há um aumento da permeabilidade do concreto, facilitando a entrada de água e outros agentes agressores para o interior do concreto (RODRIGUES, 2010; ZHANG *et al.*, 2012). Sendo assim, a armadura fica vulnerável a ação de cloretos, e outros agentes deletérios, provocando à corrosão no aço e diminuindo a vida útil das estruturas de concreto armado (AILI *et al.*, 2018).

A retração é um problema que impacta diretamente na durabilidade das estruturas, pois como visto a variação dimensional causada pela retração ocasionar o surgimento de fissuras, conforme é exposto na Figura 13.

Figura 14 - Efeitos da retração do concreto.



FONTE: Modificado de Amaral (2011).

Além de afetar a durabilidade, as fissuras ocasionadas pela retração geram problemas de ordem estética, visto que causam desconforto aos usuários das edificações. Desta forma, a ABNT NBR 6118 (2014) visando obter um bom desempenho relacionado à proteção das armaduras de aço quanto à corrosão e aceitabilidade sensorial dos usuários busca controlar a abertura de fissuras. Entende-se que a aceitabilidade sensorial é comprometida quando a situação das

fissuras causa um desconforto psicológico aos usuários, mesmo que isto não represente perda de segurança da estrutura (ABNT NBR 6118, 2014).

Nas estruturas de concreto protendido os efeitos da fluência e da retração devem ser verificados com mais rigor, pois perdas progressivas de protensão devem-se principalmente a esses fenômenos (HANAI, 2005). A protensão induz esforços de compressão prévios e de longa duração nas peças de concreto, no entanto, a retração resulta em encurtamentos do concreto na região da armadura protendida, gerando consequências no concreto protendido como a progressiva diminuição do valor da protensão instalada (RODRIGUES, 2010). Portanto, as deformações decorrentes da retração causam impactos no concreto protendido causando uma perda progressiva da força de protensão, na qual o valor inicialmente instalado sofre diminuição progressiva até se estabilizar (HANAI, 2005).

Existem diferentes tipos de retração, nas quais acontecem em tempo e magnitudes particulares, sendo importante compreender os tipos de retração para definir a melhor forma de evitá-la e prevenir o aparecimento de fissuras que são tão prejudiciais as estruturas de concreto (ORDÓÑEZ, 2013). A prevenção do surgimento de fissuras é a melhor alternativa, visto que os reparos nas estruturas fissuradas, normalmente, apresentam um custo elevado (ONGHERO, 2017).

Gilbert e Ranzi (2011) afirmam que essas fissuras são difíceis de prever e controlar, mas se não for controlado pode afetar a durabilidade e estabilidade das estruturas (GOEL *et al.*, 2007). Além dos óbvios problemas de durabilidade que as fissuras por retração podem ocasionar, a retração resulta em deflexões significativas nos elementos estruturais (GILBERT, RANZI; 2011). Percebe-se que a retração é prejudicial às estruturas de concreto armado e protendido, sendo de suma importância prever, controlar ou mesmo reduzir os efeitos ocasionados pela mesma, pois as fissuras ocasionadas pela retração podem além de afetar à durabilidade, afetar o desempenho dos elementos estruturais.

### **2.3.5 Medidas para mitigar os efeitos da retração**

Diversas medidas vêm sendo utilizadas com intuito de controlar as fissuras causadas por retração do concreto, como a dosagem adequada, procedimentos de cura, utilização de juntas de dilatação (NUNES, FIGUEIREDO, 2007), além

do uso de fibras, aditivos e adições. Segundo Nunes e Figueiredo (2007), a dosagem apropriada do concreto buscando minimizar a fissuração por retração envolve uma série de fatores como a escolha do tipo de cimento, bem como redução de seu consumo, seleção de agregados e emprego de aditivos.

No entanto, existem dificuldades em conciliar a dosagem para o controle da fissuração com outros requisitos de desempenho do concreto (NUNES, FIGUEIREDO, 2007). Conforme Repette (2005) existe a alternativa de se obter concretos com pequena retração utilizando aditivos redutores de retração, realizando a cura adequada ou ainda utilizando aditivos promotores de expansão. Nos itens a seguir são apresentadas algumas medidas adotadas para mitigar os efeitos da retração.

#### 2.3.5.1 Cura

A cura é uma forma usual para controle da fissuração devido à retração, sendo os métodos mais aplicados à cura por saturação e molhagem e a cura química, por meio da aplicação de produtos formadores de película (NUNES, FIGUEIREDO, 2007). No entanto, segundo Repette (2005), a cura por saturação e molhagem não é eficiente em elementos com grande espessura, devido à dificuldade de penetração de água para o interior do concreto, sendo mais indicada em elementos de concreto com pequena espessura.

A cura química ajuda no combate a fissuração devido à retração por secagem, no entanto, não afeta as fissuras ocasionadas pela retração autógena (NUNES, FIGUEIREDO, 2007). Sendo assim, a cura pode não ser suficiente para o controle de fissuras devido à retração, sobretudo a autógena, que é suscetível nos concretos de alta resistência, baixa relação água/cimento e grande espessura. Nos concretos de alta resistência, a microestrutura densa pode se formar em poucos dias ou menos, dificultando a entrada de água da cura externa para completar a hidratação (DEBOODT *et al.*, 2016). Neste caso, é necessário utilizar outras formas de mitigação, como a cura interna e o uso de aditivos.

A cura interna refere-se à introdução de água extra pela adição de materiais absorventes no concreto (WU *et al.*, 2017), como a utilização de materiais incorporadores de água, na forma de agregados leves saturados ou polímeros superabsorventes (JENSEN, LURA, 2006; DEBOODT *et al.*, 2016). A cura interna por

prover água dentro dos espécimes consegue manter a umidade relativa interna durante a auto dessecação podendo assim mitigar a retração autógena e também a plástica (SNOECK *et al.*, 2015).

Wu *et al.*(2017) afirmam que são materiais comumente usados para cura interna: xisto poroso, agregado cerâmico, materiais poliméricos com alta absorção de água. Segundo Ji *et al.* (2015), a substituição do agregado de peso normal pelo agregado leve saturado é capaz de reduzir a retração autógena dos concretos através da cura interna. Esses materiais possuem a capacidade de armazenarem uma grande quantidade de água, liberando-a durante a hidratação do cimento, podendo gerar uma cura interna, capaz de minimizar os efeitos da retração autógena e da cura deficiente em elementos de grande espessura (REPETTE, 2005).

#### 2.3.5.2 Juntas

Em elementos de grande superfície, o uso de juntas de dilatação é um mecanismo amplamente utilizado, principalmente em pavimentos rígidos, nas quais as juntas transversais são consideradas essenciais para evitar os danos nos pavimentos decorrentes das tensões ocasionadas por variações volumétricas como retração térmica e retração hidráulica (NUNES, FIGUEIREDO, 2007).

A ABNT NBR 6118 (2014) prevê a utilização de juntas de dilatação em estruturas sujeitas a variações volumétricas devido a deformações uniformes nas peças, sendo essas decorrentes de retração, bem como de outros fenômenos. Com a utilização de juntas de concretagem ou de dilatação, os efeitos dessas deformações podem ser minimizados (NBR 6118:2014), a norma estabelece que as juntas devem ser previstas pelo menos a cada 15 metros. No entanto, as juntas exigem medidas para impermeabilização da mesma, caso contrário, poderão ocorrer outras manifestações patológicas associadas às juntas (NUNES, FIGUEIREDO, 2007).

#### 2.3.5.3 Aditivos

Os aditivos utilizados para o controle da retração são os promotores de expansão e os redutores de retração. Os aditivos promotores de expansão são compostos que adicionados ao cimento promovem expansão do concreto se

opondo a retração, os que apresentam melhor desempenho são os à base de sulfoaluminato de cálcio (REPETTE, 2005). Os aditivos redutores de retração reduzem significativamente a tensão superficial da solução dos poros da pasta de cimento, sendo capaz de diminuir a retração no concreto (BENTZ, 2006).

De acordo Deboodt *et al.* (2016), a incorporação de aditivos redutores de retração mostrou ser eficiente na redução tanto da retração autógena, quanto da retração de secagem. Yoo *et al.* (2015) verificam o efeito dos aditivos redutores de retração no comportamento do concreto armado reforçado com fibras de altíssimo desempenho, e verificaram que a retração autógena diminui quanto maior o teor do aditivo, obtendo menores potenciais de fissuração com menores taxas de aço e maiores teores. Segundo Bentz e Jensen (2004) a adição de aditivos de redução de retração são mais utilizados para controlar a retração por secagem.

Ordóñez(2013) afirma que os polímeros superabsorventes (*Super Absorbent Polymer - SAP*) funcionam como um aditivo regulador de água, capaz de reduzir a retração autógena a níveis aceitáveis, sendo uma alternativa ao uso de aditivo químico redutor de retração.

#### 2.3.5.4 Fibras

Existem outras diferentes estratégias para controlar a retração, como a adição de fibras (poliméricas, metálicas ou de carbono). Segundo Rahmani *et al.* (2012), está bem estabelecido que a inclusão de fibras no concreto contribui para a redução da fissuração causada pela retração. Segundo Liu *et al.* (2018) as fibras possuem alta capacidade de controlar a propagação de fissuras.

De acordo com Bentur (2000) e Nunes (2006), as fibras atuam como ponte de transferência de tensões após a fissuração da matriz agindo no controle da formação, propagação, coalescência e abertura das fissuras e contribuindo para redistribuir os esforços no elemento após a fissuração. Além disso, as fibras tornam o concreto menos permeável e menos susceptível aos problemas de durabilidade associados a penetração de fluidos e agentes agressivos (BENTUR, 2000; NUNES, 2006).

Rahmani *et al.* (2012) analisou a eficiência de diferentes fibras para combater as fissuras ocasionadas devido a retração plástica, analisando os efeitos

do uso de fibras de aço, vidro e polipropileno na fração de volume de 0,1%. Hanumesh *et al.* (2018) analisam o uso de fibras de polipropileno (PP) nas propriedades mecânicas do concreto e verificaram um aumento na resistência do concreto. Atualmente, o uso de fibras de PP no concreto está se tornando comum (DAS *et al.*, 2018). No entanto, no combate a retração, as fibras de aço são mais eficazes na redução da fissuração por retração plástica em comparação com outros tipos de fibras, e as fibras de vidro tem um desempenho superior aos das fibras de polipropileno (RAHMANI *et al.*, 2012).

As fibras de aço atuam como ponte na distribuição de tensões, provocando a diminuição da concentração de tensões frente a propagação das fissuras, reduzindo a abertura, propagação e interconexão com outras fissuras (NUNES, FIGUEIREDO, 2007). Entretanto, no caso de concretos com elevado consumo de cimento, cura insuficiente ou ausência de juntas, somente a adição das fibras não é capaz de resolver o problema da fissuração (NUNES, 2006). Sendo assim, para uma maior eficiência no controle da fissuração por retração, sobretudo, em elementos de superfície, a adição de fibras ao concreto deve estar associada a outros procedimentos para reduzir a fissuração por retração, como a cura úmida ou limitação no consumo de cimento do concreto, conforme afirma Nunes (2006).

#### 2.3.5.5 Adições

A diminuição do consumo de cimento, pode ser alcançada utilizando adições, como a escória de alto forno, metacaulim, cinza volante, sílica ativa e entre outras. De acordo com Verian *et al.* (2018), usar materiais cimentícios suplementares como substituto parcial do cimento pode melhorar o desempenho do concreto. Conforme Guneyisi *et al.* (2012), Mermerdas *et al.* (2013) e Limbachiya *et al.* (2012), é possível reduzir a retração do concreto através da incorporação de adições pozolânicas, como metacaulim, sílica ativa e cinza volante, na mistura do concreto.

Contudo, segundo Habeeb e Fayyadh (2009), não é unanimidade que o uso de adições minerais pozolânicas promovam a mitigação da retração. Chandra (1997) afirma que os concretos com adições, geralmente, apresentam maior retração. Enquanto autores como Zhang e Malhotra (1996), Guneyisi *et al.*

(2012), Mermerdas *et al.* (2013) e Limbachiya *et al.* (2012), afirmam que os concretos com adições apresentam redução da retração. Os resultados contraditórios, provavelmente, são devido aos diferentes materiais, dosagens, além das diferentes características e graus de reatividade do material pozolânico (HABEEB; FAYYADH, 2009).

As adições pozolânicas promovem o refinamento dos poros, tanto pelo seu efeito fíler como pela sua reação pozolânicas, e promovem o aumento da quantidade de finos na mistura, demandando maior quantidade de água e consumo de cimento, o que pode aumentar a retração (HABEEB; FAYYADH, 2009). Porém, segundo Habeeb e Fayyadh (2009), as adições também promovem o aumento da resistência e rigidez do concreto e uma menor quantidade de saída da água, em função da menor permeabilidade deste, fatores que podem compensar os efeitos do aumento da retração pelo refinamento dos poros.

A seguir são apresentados algumas das adições utilizadas para mitigação da retração e os resultados encontrados na literatura.

#### 2.3.5.5.1 Cinza Volante

As cinzas volantes são conhecidas por sua capacidade de reduzir as deformações de retração, promovem uma redução das tensões internas reduzindo as fissuras por retração (LIMBACHIYA *et al.*, 2012). Segundo Limbachiya *et al.* (2012), a inclusão de 30% de cinza volante no concreto com diferentes valores de relação água/cimento, resultou em uma redução da deformação por retração de até 37% quando comparado aos concretos com apenas Cimento Portland. Kou *et al.* (2011) afirma que a substituição de cimento por 35% cinza volante diminuiu a resistência à compressão, entretanto, melhorou as propriedades de durabilidade dos concretos, inclusive com agregados reciclados.

A redução da retração ocorre devido ao hidrato adicional de silicato de cálcio, que é produzido através da reação pozolânica da cinza volante, densificando o concreto e diminuindo a porosidade deste. Nos concretos com agregado reciclado, a argamassa antiga aderida na superfície do agregado amplifica a reação pozolânica da cinza volante (LOTHENBACH *et al.*, 2011; KOU; POON, 2013).

Segundo Limbachiya *et al.* (2012), o teor de água da mistura de concreto é o maior contribuinte para a retração. Assim sendo, possivelmente a adição de

cinza volante promove a mitigação da retração devido a sua ação lubrificante, capaz de reduzir a quantidade de água necessária a mistura, além da sua alta capacidade de retenção de água. Durante o estágio inicial de hidratação do cimento, a cinza volante contribui para minimizar a água disponível na rede de poros para secagem externa, promovendo, conseqüentemente, a redução da magnitude da retração (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012).

#### 2.3.5.5.2 Cinza de Casca de Arroz

Segundo Habeeb e Fayyadh (2009), Isaia *et al.* (2010) e Duart *et al.* (2011), a cinza de casca de arroz, no formato de partículas graúdas, pode reduzir significativamente o efeito da retração devido a essas tornarem os concretos mais densos e ao efeito pozolânico. Conforme Duart *et al.* (2011) as reações entre o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação dos silicatos presentes no cimento, e a sílica presente na cinza de casca de arroz, produzem silicatos de cálcio hidratado com características químicas e microestrutura muito próxima aos resultantes da hidratação do cimento.

Contudo, Chatveera e Lertwattanaruk (2011) verificaram um aumento na retração em concretos com cinza de casca de arroz devido a associação da presença de água capilar e ao refinamento dos poros ocasionado pela reação pozolânica, pois houve uma diminuição dos diâmetros dos poros, porém com aumento do volume dos mesmos. Segundo Mehta e Monteiro (2014) e Diniz *et al.* (2011), estes efeitos ocasionados pela adição provocam, normalmente, maiores valores de retração.

#### 2.3.5.5.3 Sílica Ativa

A adição de sílica ativa oferece uma estrutura mais resistente à deformação causada por uma força aplicada (GUNEYISI *et al.*, 2012). Além disso, os produtos de hidratação preenchem os pequenos poros e vazios prejudiciais à estrutura do concreto, sendo esse o mecanismo capaz de reduzir a retração por secagem do concreto contendo adições minerais ultrafinas, como a sílica ativa (GUNEYISI *et al.*, 2012).

De acordo com Gholampour *et al.* (2018), as misturas com sílica ativa apresentaram menor retração por secagem do que as misturas sem adição. Conforme pesquisa desenvolvida Guneyisi *et al.* (2012), a retração por secagem das misturas de concreto contendo 5% de sílica ativa, obtiveram retração, aproximadamente, 29% menores do que a do concreto sem adição e os concretos com 15% de sílica ativa, tiveram reduções de 35%. As menores deformações de retração foram medidas no concreto contendo 15% sílica ativa quando comparado ao concreto com o mesmo teor de metacaulim (GUNEYISI *et al.*, 2012).

#### 2.3.5.5.4 Metacaulim

O metacaulim é uma classe de materiais pozolânicos obtidos da calcinação de argilominerais cauliníticos, sendo normalmente chamado de caulim (NITA *et al.*, 2004). Segundo Ray *et al.* (2012), devido à alta reatividade pozolânica do metacaulim, este promove a redução da retração dos concretos.

De acordo Guneyisi *et al.* (2012) a retração por secagem das misturas de concreto contendo 5% de metacaulim foram cerca de 33% menores do que a do concreto sem adição e para 15% as reduções foram aproximadamente de 42%. Os melhores desempenhos das misturas minerais também foram com 15% do nível de substituição de metacaulim, segundo Mermerdas *et al.* (2013).

## 2.4 RETRAÇÃO POR SECAGEM DO CONCRETO COM ACR

A retração total do concreto no estado endurecido inclui principalmente a retração autógena e por secagem (MEDJIGBODO *et al.*, 2018). Medjigbodo *et al.* (2018) analisou a retração autógena e verificou que a contribuição da mesma para o comportamento a longo prazo é assumida como insignificante, considerando a retração total medida durante o teste como retração por secagem.

Os dados experimentais de Medjigbodo *et al.* (2018) confirmam os resultados encontrados na literatura, na qual a substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado resulta em um aumento na retração por secagem (PEDRO *et al.*, 2017; SEARA-PAZ *et al.*, 2016, GONZALEZ-COROMINAS E ETXEBERRIA, 2016). Medjigbodo *et al.* (2018) afirma que a influência do agregado de concreto reciclado na retração final foi significativa, mas relativamente

baixa e além disso, o tempo de retração aumentou, o que permite melhor relaxamento das tensões com o tempo em caso de retração contida.

Os agregados reciclados tem uma alta absorção de água o que exige um elevado teor de água para melhorar a trabalhabilidade e se obter uma boa mistura (POON *et al.*, 2002). Sendo assim, os concretos com agregado reciclado são mais susceptíveis a retração por secagem. Tam e Tam (2007) afirmam que os concretos com agregado reciclado geralmente apresentam uma maior retração, e que quanto maior o teor de substituição do agregado pior é o desempenho do concreto.

Manzi *et al.* (2013) investigaram os efeitos dos agregados de concreto reciclados sobre as propriedades físicas e mecânicas de curto e longo prazo de concretos estruturais e concluíram que a retração é influenciada negativamente pelo uso de agregados reciclados de concreto. No entanto, afirmam que é evidente a falta de dados generalizados e confiáveis sobre as propriedades de longo prazo.

Lotfy e Al-Fayez (2015) verificaram uma maior ocorrência de retração por secagem nas misturas experimentais contendo agregado reciclado de concreto, na qual a mistura com agregado graúdo de concreto reciclado apresentou desempenho equivalente à mistura com agregado natural, enquanto que as misturas de agregado miúdo reciclado resultaram em uma retração por secagem mais alta.

Diversos fatores influenciam a retração do concreto, no entanto, devido às propriedades do agregado reciclado, existem fatores relacionados ao agregado reciclado que também influenciam na retração, neste caso, do concreto com agregado reciclado.

#### **2.4.1 Fatores que influenciam à Retração no Concreto com ARC**

Silva *et al.* (2015a) afirmam através de uma revisão da literatura que o concreto com agregado reciclado tende a apresentar maior retração do que um concreto com agregado natural, e a magnitude da retração depende de vários fatores relacionados ao uso do agregado reciclado. Dentre esses fatores, o teor de

substituição, procedimento de mistura adotado, procedimento de britagem, qualidade do agregado reciclado, entre outros. A seguir são apresentados alguns desses fatores que influenciam a retração no concreto com ARC.

#### 2.4.1.1 Teor de Substituição

O desempenho do concreto com agregado reciclado é influenciado pela composição do resíduo utilizado para produzir o agregado reciclado, bem como pela taxa de substituição (RAO *et al.*, 2007). Na literatura é possível identificar diversos trabalhos que utilizam variados valores de teor de substituição. Na Tabela 10 e 11 são apresentados os intervalos em percentagens de substituição do agregado natural por agregado miúdo e graúdo reciclado, respectivamente, para diferentes autores nos últimos 10 anos.

Os teores de substituição dos agregados reciclados variam entre os diversos autores, no entanto, verifica-se nas pesquisas realizadas nos últimos anos que a maioria faz utilização de teores de substituição maiores que 30% para os agregados graúdos reciclados (Tabela 11). Os estudos com a inclusão de agregados miúdos reciclados ainda são reduzidos (Tabela 10) comparado ao graúdo, conforme mostrado na Figura 15. Possivelmente, isso é devido aos agregados miúdos obtidos de concreto serem muito porosos e aparentarem não indicados para uso em concreto estrutural (PEPE *et al.*, 2016).

Tabela 10 - Pesquisas com os teores de substituição dos agregados miúdos reciclados.

Teor de Substituição %	Autores
<30	Pedro <i>et al.</i> (2017), Cabral <i>et al.</i> (2010), Puthussery <i>et al.</i> (2017), Lotfy e Al-Fayez (2015), Andrade <i>et al.</i> (2020).
≥30 <70	Pedro <i>et al.</i> (2017a), Kurda <i>et al.</i> (2017), Pedro <i>et al.</i> (2017), Omary <i>et al.</i> (2016), Cabral <i>et al.</i> (2010), Puthussery <i>et al.</i> (2017), Andrade <i>et al.</i> (2020).
≥70 ≤100	Pedro <i>et al.</i> (2017a), Kurda <i>et al.</i> (2017), Liu <i>et al.</i> (2018), Pedro <i>et al.</i> (2017), Omary <i>et al.</i> (2016), Cabral <i>et al.</i> (2010), Puthussery <i>et al.</i> (2017).

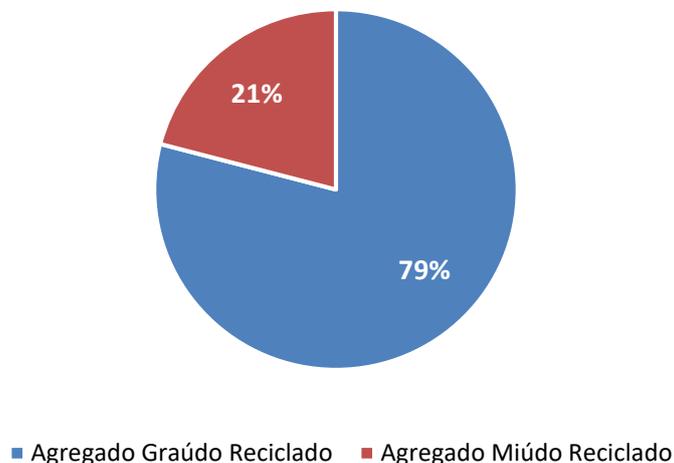
FONTE: Autora (2022).

Tabela 11 - Pesquisas com os teores de substituição dos agregados graúdos reciclados.

Teor de Substituição %	Autores
<30	Manzi <i>et al.</i> (2013), Lotfy e Al-Fayez (2015), Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), Puthussery <i>et al.</i> (2017), Akça <i>et al.</i> (2015), Bravo <i>et al.</i> (2018), Cabral <i>et al.</i> (2010), Hanumesh <i>et al.</i> (2018), Pedro <i>et al.</i> (2017), Amer <i>et al.</i> (2016), Katkhuda e Shatarat (2017), Ferreira <i>et al.</i> (2011).
≥30 <70	Manzi <i>et al.</i> (2013), Medjigbodo <i>et al.</i> (2018), Lotfy e Al-Fayez (2015), Tam <i>et al.</i> (2015), Fathifazl <i>et al.</i> (2011), Dodds <i>et al.</i> (2017), Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), Puthussery <i>et al.</i> (2017), Akça <i>et al.</i> (2015), Gholampour e Ozbakkaloglu (2018), Leite e Monteiro (2016), Bravo <i>et al.</i> (2018), McGinnis <i>et al.</i> (2017), Cabral <i>et al.</i> (2010), Hanumesh <i>et al.</i> (2018), Omary <i>et al.</i> (2016), Pepe <i>et al.</i> (2016), Ahmadi <i>et al.</i> (2017), Hayles <i>et al.</i> (2018), Pedro <i>et al.</i> (2017), Amer <i>et al.</i> (2016), Pedro <i>et al.</i> (2017a), Gao <i>et al.</i> (2017), Afroughsabet <i>et al.</i> (2017), Ferreira <i>et al.</i> (2011).
≥70 ≤100	Medjigbodo <i>et al.</i> (2018), Tam <i>et al.</i> (2015), Pedro <i>et al.</i> (2014), Fathifazl <i>et al.</i> (2011), Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), Puthussery <i>et al.</i> (2017), Dodds <i>et al.</i> (2017), Gholampour e Ozbakkaloglu (2018), Bravo <i>et al.</i> (2018), McGinnis <i>et al.</i> (2017), Cabral <i>et al.</i> (2010), Ferreira <i>et al.</i> (2011), Hanumesh <i>et al.</i> (2018), Das <i>et al.</i> (2018), Omary <i>et al.</i> (2016), Pepe <i>et al.</i> (2016), Ahmadi <i>et al.</i> (2017), Bui <i>et al.</i> (2018), Hayles <i>et al.</i> (2018), Liu <i>et al.</i> (2018), Pedro <i>et al.</i> (2017), Amer <i>et al.</i> (2016), Pedro <i>et al.</i> (2017a), Kurda <i>et al.</i> (2017), Gao <i>et al.</i> (2017), Butler <i>et al.</i> (2013), Afroughsabet <i>et al.</i> (2017).

FONTE: Autora (2022).

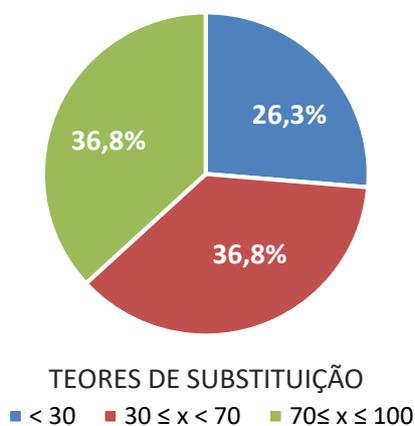
Figura 15 – Proporção de trabalhos desenvolvidos com agregado reciclado miúdo e agregado reciclado graúdo.



FONTE: Autora (2022).

A Figura 16 apresenta a percentagem de pesquisas de acordo com o teor de substituição para os agregados miúdos reciclados. Observa-se que a maioria das pesquisas com agregado miúdo reciclado utiliza valores de teores de substituição maiores que 30% de substituição, na faixa de 30% a 70% e de 70% até 100% apresentam o mesmo número em percentagem de trabalhos.

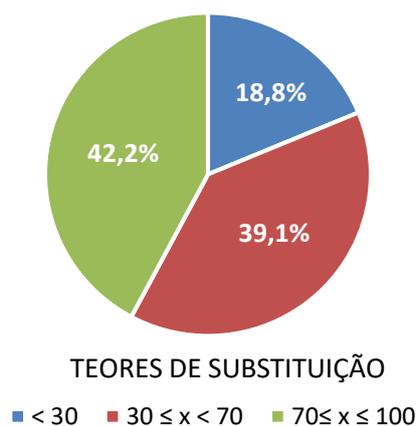
Figura 16 – Proporção de trabalhos por teor de substituição de agregado miúdo reciclado.



FONTE: Autora (2022).

A Figura 17 apresenta a porcentagem de trabalhos desenvolvidos de acordo com o teor de substituição para o agregado graúdo reciclado, na qual a maioria das pesquisas (42,2%) trabalham com teores de substituição de 70% até 100%.

Figura 17 – Proporção de trabalhos por teor de substituição de agregado graúdo reciclado.



FONTE: Autora (2022).

Muitos estudos avaliam o efeito da variação do teor de substituição, em função do tipo de agregado (miúdo e graúdo) e outras condições, na retração do concreto com agregado reciclado (MANZI *et al.*, 2013; MEDJIGBODO *et al.*, 2018; LOTFY E AL-FAYEZ, 2015; TAM *et al.*, 2015; TAM; TAM, 2007; PEDRO *et al.*, 2017). Tam *et al.* (2015) afirmam que quanto maior a taxa de substituição de agregados naturais por reciclados maior é a retração por secagem no concreto.

Medjigbodo *et al.* (2018) afirmam que o aumento na retração por secagem do concreto com agregado reciclado em comparação com o agregado convencional é devido a presença de uma maior quantidade de pasta de cimento (pasta antiga mais nova pasta) nos concretos com agregado reciclado. Desta forma, os concretos com agregado reciclado apresentam uma maior porosidade, tendo uma menor restrição a deformação, resultando em uma taxa de retração maior que a do concreto com agregado natural (MEDJIGBODO *et al.*, 2018). Segundo Ahmadi *et al.* (2017), os agregados miúdos reciclados possuem uma quantidade

considerável de argamassa aderida, essa além de afetar a trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado, aumenta sua deformação, pois diminui o módulo de elasticidade e resistência.

De acordo Medjigbodo *et al.* (2018) a influência do agregado reciclado na retração não pode ser generalizada, e a proporção do agregado reciclado não é o único parâmetro de influência. Resultados experimentais de Medjigbodo *et al.* (2018) mostram que uma mistura com maior quantidade de agregado reciclado, utilizando uma maior distribuição granulométrica (4-10mm e 10-20mm), apresentou menor retração que uma mistura com menor quantidade de agregado reciclado com distribuição granulométrica menor (10-20mm).

Dados como de Manzi *et al.* (2013) confirmam que mesmo para menores proporções de agregado reciclado, pode ocorrer uma maior retração devido as propriedades do agregado. Misturas com 36,5% de teor de substituição apresentou menor retração que misturas com 27%, este resultado é decorrente das misturas com 27% o agregado reciclado apresentar menor massa específica, ou seja, mais poroso que o agregado reciclado utilizado nas misturas com 36,5% de substituição, o que justifica a retração superior.

Na pesquisa realizada por Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), os autores analisaram a retração para diferentes taxas de substituição (20%, 50% e 100%) e agregados de diferentes concretos de origem (40MPa, 60MPa e 100MPa). Nos concretos com agregado obtidos de concreto de origem com 40MPa, para taxa de substituição de 20% teve um aumento na retração de aproximadamente 20%, para teores de 50% o valor de aumento foi cerca de 50,2 % e já para 100% o aumento foi próximo de 132%. Nos concretos com agregados obtidos com concreto de origem com 60 MPa, os valores do aumento da retração são cerca de 34%, 39% e 50% para teores de substituição de 20%, 50% e 100%, respectivamente. Segundo os autores as maiores retrações por secagem ocorrem nos concretos com maiores taxas de substituição (100%) e concreto de origem do agregado reciclado de menor qualidade (40MPa). A influência dos agregados reciclados foi menor quando se utilizaram os agregados de qualidade mais alta (100 MPa). De acordo Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), a retração por secagem aumenta à medida que a qualidade do agregado reciclado diminuiu e a taxa de substituição do mesmo aumenta.

No entanto, a maioria dos concretos utilizados na construção apresentam resistência de 25 a 35 MPa (Hayles *et al.*, 2018). Desta forma, os agregados reciclados provenientes dos RCC podem ocasionar um aumento significativo na retração do concreto com agregado reciclado. Deve-se ter cautela no uso de 100% de agregado reciclado em elementos estruturais de concreto, pois existe a tendência de redução na resistência mecânica e um aumento considerável na retração por secagem, requerendo uma quantidade maior de cimento e um estudo de dosagem adequado para manter a relação água/cimento.

A retração é um fenômeno que ocorre ao longo do tempo, segundo Pedro *et al.* (2014) ocorrem geralmente maiores aumentos da retração do concreto com agregado reciclado em 91 dias. Este aumento é justificado por um fenômeno de cura interna promovido pelo agregado de concreto reciclado que permite a compensação da água de evaporação pela água armazenada no seu interior (Pedro *et al.*, 2014). De acordo com Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), a retração por secagem dos concretos também é estabelecida após 90 dias de teste. De acordo com Bravo *et al.* (2018) a substituição total do agregado natural por reciclado provoca decréscimos significativos no desempenho, na qual verificou-se que a retração aos 91 dias um aumento de 19% a 91%.

#### 2.4.1.2 Origem do Agregado Reciclado de Concreto (ARCO)

As propriedades do concreto de origem dos agregados reciclados possuem influência direta nas propriedades do concreto produzido com eles, afetando conseqüentemente no comportamento à retração do concreto com ARCO. Este comportamento é decorrente das propriedades que o agregado reciclado pode apresentar devido ao concreto que o originou, como a absorção e porosidade. Segundo Pepe *et al.* (2016) a capacidade de absorção da água do agregado reciclado pode ser associada a qualidade do ACRO.

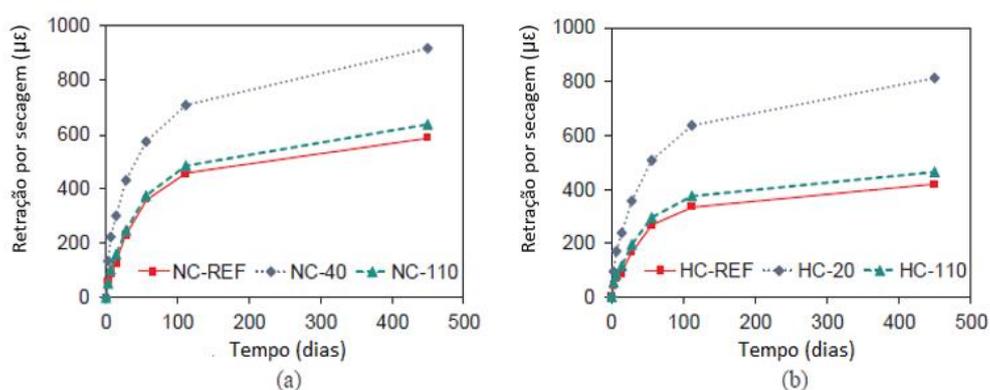
Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016) afirmam que a menor qualidade dos agregados reciclados empregados é associada a menor resistência do concreto de origem, bem como as altas taxas de substituição por ARCO, na qual resultam em valores mais altos de retração por secagem. A maior qualidade do concreto afeta as propriedades do agregado reciclado e conseqüente-

mente, o desempenho do concreto em relação a retração. Os agregados oriundos do concreto de alta resistência, com 100 MPa apresentaram maior massa específica e menor absorção, resultando em menor retração comparado aos de 60 MPa e 40MPa (GONZALEZ-COROMINAS E ETXEBERRIA, 2016).

Ghoulampour e Ozbakkaloglu (2018) analisaram a retração por secagem para concretos de resistência normal (NC – 40MPa) e de alta resistência (HC – 80MPa), variando a resistência do concreto de origem dos agregados reciclados (20MPa, 40 MPa e 110MPa). Nos concretos NC o teor de substituição do AR foi de 50% e foram utilizados agregados com concreto de origem de resistência 40 MPa e 110MPa, e as misturas HC o teor de substituição do AR foi de 100% e utilizou-se agregados com concreto de origem de resistência 20 MPa e 110MPa.

Verificou-se nos resultados de Ghoulampour e Ozbakkaloglu (2018) que a retração dos concretos produzidos com ARCO de maior resistência (110 MPa) não sofreu mudanças significativas ao longo do tempo comparado ao concreto referência, sem agregado reciclado (NC-REF, HC-REF), a diferença foi em torno de 7% e 10%, respectivamente, NC-110 e HC-110. A Figura 18 apresenta os resultados de Ghoulampour e Ozbakkaloglu (2018), na qual observa-se que as misturas HC exibiram menor retração por secagem do que as misturas NC, possivelmente, devido a presença de maior quantidade de água residual após a hidratação das misturas NC, que devido a saída da água resulta em maiores deformações (GHOULAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018).

Figura 18 – Variação da retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ): (a) Concreto de resistência normal (40MPa) e 50%AR; (b) Concreto de alta resistência (80MPa) e 100%AR.



FONTE: Adaptado de Ghoulampour e Ozbakkaloglu (2018).

Existe uma influência da resistência do concreto de origem na retração dos concretos, pois em ambas as misturas NC e HC, os concretos contendo ARCO de menor resistência (NC-40 e HC-20) apresentaram uma retração por secagem significativamente maior (GHOULAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018).

Kou e Poon (2015), após analisar a retração de concretos com ARCO de resistências de 30 MPa e 100MPa, verificaram que os concretos produzidos com os agregados de maiores resistência (100 MPa) apresentaram menor retração por secagem que o concretos obtidos com ARC de 30 MPa. Possivelmente, este comportamento é decorrente de uma maior absorção de água nos concretos com ARCO de 30MPa e menor módulo de elasticidade dos ARCO de menor resistência quando comparados aos agregados originados do concreto de maior resistência (KOU; POON, 2015).

No entanto, os resultados de Padmini *et al.* (2009) indicam que quanto maior a resistência do concreto de origem, pode ocorrer maior argamassa aderida ao mesmo e ocasionar uma maior absorção do agregado reciclado o que afeta a retração do concreto. Pedro *et al.* (2014) analisaram a retração para 100% de substituição do agregado gráudo natural por agregado de concreto reciclado, variando a resistência do concreto de origem (20 MPa, 45 MPa e 65 MPa), e verificaram que os concretos confeccionados com agregado reciclados de concretos de baixa resistência, os valores de retração foram menores que os de resistência média e alta. A resistência do concreto de origem não pode ser o único parâmetro a ser considerado na qualidade do ARCO, pois o teor de argamassa aderida ao mesmo é um parâmetro que afeta a retração, como mostra os resultados de Padmini *et al.* (2009) e Pedro *et al.* (2014).

Segundo Fathifazl *et al.* (2011) o tipo de agregado do ARCO, se calcário ou cascalho de rio, tem pouco efeito sobre a retração por secagem das misturas. Com relação a forma de fabricação, os agregados de concreto reciclado fabricados em laboratório são equivalentes aos agregados reciclados de concretos pré-moldados de mesma resistência (PEDRO *et al.*, 2014).

#### 2.4.1.3 Condição do Agregado

Segundo Rao *et al.* (2007) o desempenho do concreto com agregado reciclado é influenciado pela condição de utilização do mesmo, se saturado ou não

saturado. O agregado reciclado apresenta alta capacidade de absorção e se o mesmo não estiver úmido, ele absorverá a água da mistura afetando a trabalhabilidade do concreto e o controle da relação água/cimento (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a).

Devido à maior absorção dos agregados reciclados, é recomendado que o agregado seja utilizado na condição saturada para evitar que o mesmo absorva a água da pasta, permitindo assim a produção de concreto com agregado reciclado com trabalhabilidade semelhante às misturas com agregado natural (SILVA *et al.*, 2015a). No entanto, de acordo com Etxeberria *et al.* (2007a), os agregados reciclados não devem ser totalmente saturados, pois isso poderia gerar uma falha na zona de transição interfacial efetiva entre os agregados graúdos reciclados saturados e a nova pasta de cimento, afetando a penetração da pasta de cimento nos poros superficiais do agregado.

Os agregados reciclados quando utilizados na condição úmida não saturada, permitem uma trabalhabilidade adequada e mantem a relação água/cimento efetiva (ETXEBERRIA *et al.*, 2007a). Leite e Monteiro (2016) avaliam o uso do agregado na condição inicial seca e saturado de superfície seca (SSS), afirmando que a condição ideal para o uso agregado reciclado é saturada com superfície seca.

Silva *et al.* (2015b) afirmam que ao utilizar o agregado no estado saturado de superfície seca é possível impedir que os mesmos absorvam a água livre da mistura. Segundo Ferreira *et al.* (2011) é possível atingir tal condição pré-saturando o agregado reciclado 24h antes da mistura, reduzindo a absorção de água, ou mesmo deixá-los quase saturados, quando a absorção de água se torna insignificante. Também é possível atingir a condição saturada de superfície seca usando o método de compensação de água. O método de compensação de água utiliza água adicional na mistura correspondente à quantidade absorvida pelo agregado reciclado em um determinado período (FERREIRA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2015b), mantendo assim a quantidade de água livre da mistura. A água adicional e o tempo para absorvê-la dependem do tamanho do agregado e da capacidade de absorção do mesmo (SILVA *et al.*, 2015b).

No entanto, quando é empregado um agregado de alta absorção de água na mistura, como os agregados reciclados, ocorre que o mesmo não é capaz de

absorver a quantidade de água equivalente à sua própria absorção durante o tempo de mistura (ANDRADE *et al.*, 2020). Desta forma, a quantidade de água absorvida pelo agregado reciclado ao longo do tempo deve ser estimada para determinar com precisão o tempo de mistura (MATIAS *et al.*, 2013).

Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016) utilizaram os agregados com saturação de 80 a 90% no momento da produção de concreto, sendo adicionado mais água no momento da mistura para compensar a água absorvida pelos agregados reciclados, mantendo constante a relação e água/cimento efetiva. Cabral *et al.* (2010) utilizou os agregados reciclados umedecidos com 80% da água que seria absorvida em 24 h. Andrade *et al.* (2020) utilizaram 80% da capacidade de absorção de água dos agregados miúdos reciclados.

Leite (2001) utilizou a pré-umidificação do agregado com base na curva de absorção do mesmo, na qual foi compensada apenas parte da taxa de absorção, entre 40% e 50% de absorção do material. Leite e Monteiro (2016) utilizaram a compensação de 70% de absorção do agregado, mesmo valor de Leite *et al.* (2013). De acordo com Etxeberria *et al.* (2007a), um nível recomendado de umidade seria 80% da capacidade de absorção, porém, o mais importante é que os agregados sejam molhados para reduzir a sua capacidade de absorção. Ferreira *et al.* (2011) afirmam que 90% do nível de saturação é o ideal, enquanto que 100% do nível de saturação pode ocasionar um efeito prejudicial no concreto.

A ABNT NBR 15116 (2021) define critérios para utilização de agregados reciclados para o uso em argamassas e concretos, inclusive considerando a pré-molhagem e a compensação de água. Os agregados reciclados podem ser utilizados sem a pré-saturação, no entanto, deve-se haver a compensação de água absorvida pelo agregado e não a incluir no cálculo da relação água/cimento (ABNT NBR 15116, 2021).

Ferreira *et al.* (2011) e Pedro *et al.* (2014) comparam a pré-saturação com o método de compensação de água. Ferreira *et al.* (2011) empregaram 90% do nível de saturação, utilizando o método de compensação de água e a pré-saturação. Observou-se que os resultados de retração foram maiores nos concretos com agregados pré-saturadas do que com a compensação de água da mistura. Pedro *et al.* (2014) concluíram que a pré-saturação do agregado reciclado foi levemente prejudicial ao desempenho mecânico do concreto e, principalmente,

ao desempenho de durabilidade, em comparação com o método de compensação da água de mistura. No entanto, a condição do agregado não é o único condicionante, pois o projeto e procedimento de mistura também afetam o comportamento de longo prazo do concreto.

#### 2.4.1.4 Métodos de Dosagem

Os métodos de dosagens utilizados para a misturas de concreto comum não são indicados para serem aplicados em concreto com AR, pois a maior porosidade do ARCO pode afetar as propriedades dos concretos com agregado reciclado (PEPE *et al.*, 2016; AMARIO *et al.*, 2017). Segundo Fathifazl *et al.* (2011), a dosagem tem grande influência na retração do concreto, bem como a argamassa residual dos agregados reciclados que está relacionada ao concreto de origem e que afetam as propriedades do agregado reciclado. É importante o uso adequado de um método de dosagem para concretos com agregado reciclado, pois ao realizar uma substituição direta do agregado natural por ACR nem sempre é possível prever o desempenho requerido, pois os agregados reciclados possuem características diferentes dos agregados naturais (RANGEL *et al.*, 2017).

Fathifazl *et al.* (2011) propõem uma dosagem para o concreto com agregado reciclado baseada nas frações de volume dos materiais, na qual a argamassa fresca e as proporções de agregados naturais da mistura de referência são ajustadas, de tal forma que os volumes de argamassa total e agregados naturais totais na mistura com agregado reciclado se tornem iguais ao da mistura de referência. O resultado final deste processo é um concreto com agregado reciclado que tenha o mesmo volume de argamassa total e agregado natural que o concreto com agregado natural de referência (FATHIFAZL *et al.*, 2011). Os autores afirmam que a principal diferença entre os dois é que a argamassa total no concreto com agregado natural é toda argamassa fresca, enquanto no concreto com agregado reciclado é uma combinação de argamassa fresca e residual. Fathifazl *et al.* (2011) observaram que o método proposto produz concreto com menor retração que misturas similares proporcionadas pelos métodos convencionais.

Andrade *et al.* (2020), Rangel *et al.* (2017), Amario *et al.* (2017), utilizam uma dosagem científica através do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC). Este modelo considera que as principais propriedades físicas e mecânicas do concreto são geridas pela densidade de empacotamento geral da estrutura granular (RANGEL *et al.*, 2017). O modelo baseia-se em uma teoria que considera o empacotamento de misturas secas para todos os componentes que são utilizados na dosagem dos concretos (ANDRADE, 2018).

A metodologia proposta por Pepe *et al.*, (2016) utilizando o MEC prevê a resistência do concreto com agregado reciclado considerando características específicas dos agregados de concreto reciclado. O método utilizado no modelo garante um controle das principais propriedades da mistura (ANDRADE *et al.*, 2020), pois são utilizados dados dos materiais constituintes para determinar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, posteriormente, os concretos são produzidos de acordo com os traços fornecidos e verifica-se se as propriedades desejadas foram alcançadas (RANGEL, 2015). Essa é a principal vantagem do método, considerar as características intrínsecas de cada composto e obter as propriedades desejadas, tanto no estado fresco quanto endurecido, do concreto resultante (AMARIO *et al.*, 2017).

Segundo Andrade (2018), no primeiro módulo do método do MEC é obtido o empacotamento virtual, na qual calcula-se o maior empacotamento possível para uma determinada mistura. Em um segundo módulo, é obtido de forma experimental o empacotamento real, que é baseado na compactação dos grãos, e então, são feitas correlações entre a compactação virtual e real por um coeficiente de empacotamento (K) (ANDRADE, 2018). O MEC define dois parâmetros que são calibrados, um representa a ligação agregado e pasta, o outro identifica a resistência intrínseca do agregado (RANGEL *et al.*, 2017).

O método de dosagem através do MEC apresentou resultados satisfatórios para os concretos com agregado graúdo reciclado, podendo ser empregado para a produção de concretos estruturais de resistência normal e alta (PEPE, *et al.*, 2016; RANGEL *et al.*, 2017; AMARIO, *et al.* 2017). Segundo Rangel *et al.* (2017) e Amario *et al.* (2017), o método possibilitou obter concretos com a resistência à compressão desejada, na qual o uso de agregado reciclado não afetou o desempenho mecânico do concreto resultante. O método também pode ser utilizado

para dosagem de misturas de concreto de resistência normal e alta contendo agregado miúdo reciclado (ANDRADE *et al.*, 2020).

A metodologia de dosagem proposta por Pepe *et al.* (2016) revela que apesar da influência de diversos parâmetros (processamento do ACR, concreto de origem ACR, teor de substituição, relação água/cimento, condição do agregado, absorção) na resistência à compressão, a resistência pode ser prevista levando-se em consideração apenas um parâmetro, a capacidade de absorção de água, na qual inclusive pode ser associada a qualidade do ACR. Resultados como o método utilizando MEC é o primeiro passo para a previsão completa de outros aspectos do desempenho do concreto com ARCO, como comportamento de longo prazo, como a retração e fluência e as propriedades relacionadas à durabilidade (PEPE *et al.*, 2016).

A evolução dos métodos de projeto de mistura e métodos de produção de concreto com agregado reciclado mostrou que é possível reduzir o impacto negativo do agregado miúdo reciclado nas propriedades do concreto (MERLET; PIMIENTA, 1993; ANDRADE *et al.*, 2020). É possível obter concretos com agregado miúdo reciclado que apresentam menor deformação de retração, para o mesmo teor de substituição, que o concreto produzido com agregado graúdo reciclado devido a forma de dosagem utilizado para as misturas. O método possibilita minimizar o efeito deletério do agregado miúdo reciclado sobre a resistência e o módulo de elasticidade, apesar do aumento da capacidade de absorção de água do concreto. Esse resultado corrobora a hipótese apresentada por Silva e Brito (2015) de que é possível reduzir a deformação por retração do concreto com agregado reciclado melhorando o método dosagem da mistura ou modificando o processo de mistura.

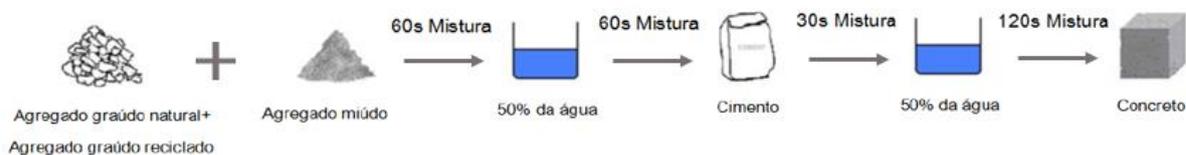
#### 2.4.1.5 Procedimento de Mistura

O procedimento de mistura também influencia o comportamento do concreto à retração, sendo a condição de umidade do agregado um fator que afeta a relação água/cimento da mistura, a trabalhabilidade e à retração. A abordagem de mistura de dois estágios (TSMA) foi desenvolvido por Tam *et al.* (2005) no intuito de melhorar a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado, na qual os autores comprovaram a melhoria na resistência pela TSMA. Já

Tam e Tam (2007) verificaram a durabilidade, em termos de deformação (retração e fluência) e permeabilidade, concluindo que a deformação e permeabilidade do concreto com ACR podem ser melhoradas ao adotar o TSMA.

A abordagem de mistura de dois estágios consiste em pré-umedecer o agregado reciclado antes de adicionar o cimento, a fim de fortalecer o vínculo fraco do agregado reciclado com a nova pasta de cimento (SILVA *et al.*, 2015b). Diferentemente da abordagem de mistura normal, na qual todos os componentes são colocados no misturador ao mesmo tempo, a abordagem em dois estágios propõe dividi-lo em duas etapas (SILVA *et al.*, 2015a). O método de misturas em duas etapas (TSMA) é descrito por Tam *et al.* (2005), conforme esquema exposto da Figura 19. O TSMA consiste em colocar inicialmente os agregados graúdos e miúdos e misturá-los por 60 s, seguido pela adição de metade da água e, em seguida misturar os materiais por 60 s. Posteriormente, o cimento é adicionado à mistura, sendo misturada por 30 s, e finalmente é acrescentado a metade restante da água e depois misturada por mais 120 s.

Figura 19 – Método de mistura em duas etapas.



FONTE: Tam *et al.* (2005).

De acordo com Leite e Monteiro (2016) este método mostrou-se eficiente na produção de concreto com agregado reciclado. O processo de pré-mistura é capaz de preencher alguns poros e rachaduras, resultando em um concreto mais denso, uma zona interfacial melhorada ao redor do agregado reciclado e, portanto, um desempenho melhor comparado quando utilizando a abordagem de mistura tradicional (TAM *et al.*, 2005). Na literatura existem diversos trabalhos que vem adotando o procedimento de mistura o TSMA como Santos (2016), Leite e Monteiro (2016), Amario *et al.* (2017) e Das *et al.* (2018).

Segundo Bravo *et al.* (2018), uma forma prática para melhorar o desempenho dos concretos com agregado reciclado é o uso de superplastificante. Assim, existem diversos métodos de misturas, como o utilizado por Hanumesh *et al.* (2018), na qual o agregado graúdo reciclado foi misturado a seco com o superplastificante até que a mistura ficasse uniforme. O uso do superplastificante busca obter a trabalhabilidade adequada (AKÇA *et al.*, 2015), pois a trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado diminui devido à alta tendência de absorção de água do ACR.

No entanto, devido os concretos com ACR apresentarem menor trabalhabilidade que o concreto convencional é necessária uma quantidade superior de aditivo (ETXEBERRIA *et al.* 2007a). De acordo com Amer *et al.* (2016), o concreto com agregados reciclados secos requer uma grande quantidade de superplastificante para atingir os parâmetros reológicos adequados. Nos agregados reciclados pré-saturados a dose necessária de superplastificante é menor, sendo assim, o uso de agregados reciclados pré-saturados é melhor para manter uma dose adequada de superplastificante (AMER *et al.*, 2016).

Na literatura o uso de superplastificante ou redutor de água é uma prática comum na confecção dos concretos reciclados (VERIAN *et al.* 2018; BRAVO *et al.*, 2018; SARAVANAKUMAR *et al.*, 2016; OMARY *et al.*, 2016; DAS *et al.*, 2018; HANUMESH *et al.* 2018; PUTHUSSERY *et al.*, 2017; ETXEBERRIA *et al.*, 2007a; MANZI *et al.*, 2013; MEDJIGBODO *et al.*, 2018; SEARA-PAZ *et al.*, 2016; LOTFY; AL-FAYEZ, 2015; PEDRO *et al.*, 2014; FATHIFAZL *et al.*, 2011; GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA, 2016).

Bravo *et al.* (2018) avaliou os superplastificantes verificando que os policarboxílicos são mais adequados ao concreto com agregado reciclado que o lignossulfonato. Os superplastificantes à base de policarboxílicos permitem a utilização de concretos reciclados estruturais considerando o requisito da durabilidade (BRAVO *et al.*, 2018). Lotfy e Al-Fayez (2015) afirmam a inclusão do aditivo redutor de água reduziu significativamente a retração por secagem do concreto reciclado. Segundo Bravo *et al.* (2018) o uso de superplastificante beneficia tanto as propriedades relacionadas com a durabilidade quanto a retração do concreto, pois o mesmo aumenta a trabalhabilidade, permitindo menores relação água/cimento (PUTHUSSERY *et al.*, 2017).

O projeto do concreto varia de mistura para mistura, mas qualquer material que altere a estrutura dos poros da pasta de cimento afeta a retração do concreto (ZIA *et al.*, 1997). Sendo assim, o método de dosagem, procedimento de mistura e os materiais utilizados na confecção dos concretos com agregados reciclados podem afetar o comportamento a retração, por exemplo: o tipo de cimento, a relação água/cimento, o uso de adições e aditivos, assim como o próprio agregado reciclado.

## **2.5 MODELOS DE PREVISÃO DA RETRAÇÃO**

O uso de agregados reciclados afeta o comportamento do concreto, sobretudo seu comportamento ao longo do tempo, como a retração. Para viabilizar o uso do concreto com agregado reciclado é importante prever o seu comportamento através de modelos teóricos. Os primeiros modelos foram formulados com o objetivo de facilitar a análise estrutural e com o uso de computadores tornou-se possível usar qualquer tipo de modelo, permitindo que a modelagem recente busque representar através de curvas teóricas o comportamento mais próximo dos dados experimentais (BAZANT, 2001). Presume-se que quanto maior a quantidade de dados de entrada nos modelos, melhor a aproximação dos mesmos aos dados experimentais (KATAOKA, 2010). No entanto, para que os modelos possam ser aplicados em projetos, os parâmetros de entrada devem ser dados capazes de descrever de forma simples o comportamento a retração ao longo do tempo.

Nas estruturas de concreto, deve-se ter um controle da retração, pois como visto, a mesma afeta o desempenho das estruturas causado deformações e fissuração. Segundo Hubler *et al.* (2015a), fissuras extensas e grandes deformações podem comprometer seriamente a manutenção, a durabilidade e, portanto, a capacidade resistente das estruturas a longo prazo. A retração e a fluência são deformações dependentes do tempo que, juntamente com a capacidade resistente do concreto, geram preocupação para os projetistas devido ao grau de incerteza associado à sua previsão (ZIA *et al.*, 1997). Para viabilizar o uso do concreto com agregado reciclado é importante prever o seu comportamento através de modelos teóricos.

No entanto, a formulação de um modelo de previsão abrangente não é uma tarefa fácil, diferentes modelos podem descrever bem o comportamento de um fenômeno, entretanto, para que os modelos sejam aceitáveis é necessário além de ajustar bem aos dados experimentais, está em conformidade com os vários fenômenos físicos envolvidos (BAZANT, 2001). Além disso, cada modelo possui restrições de uso, como tipo de cimento, relação água/cimento, umidade relativa, devendo respeitar as restrições para se obter resultados válidos (KATAOKA, 2010). Atualmente, diversos modelos foram propostos para prever o comportamento da retração, nas quais serão abordados nos tópicos a seguir.

Os modelos existentes para prever a retração em função do tempo possuem o mesmo princípio, apresentam uma curva hiperbólica que tende a um valor assintótico que representa o valor máximo de retração do concreto (SILVA *et al.*, 2015a). Os modelos exibem inicialmente um rápido aumento de deformações, depois o desenvolvimento da deformação é mais lento ao longo do tempo (VINKLER; VÍTEK, 2017). A forma da curva e o valor final dependem de vários fatores, como as condições de cura, o projeto de mistura, a umidade relativa, entre outros (SILVA *et al.*, 2015a). No entanto, para o que modelo represente de forma adequada os dados experimentais é necessário que o mesmo considere os parâmetros que influenciam no comportamento a retração.

Segundo Vinkler e Vítek (2017) são fatores que influenciam a retração: a composição do concreto; o tamanho da amostra; as condições ambientais, como a temperatura e umidade locais. Com relação a mistura do concreto, Wu *et al.* (2017) afirmam que o cimento (composição e finura), a presença de materiais cimentícios suplementares (sílica ativa, escória, cinza volante), relação água/aglomerante, os agregados, o uso de fibras (fibra de aço, sintéticas, de celulose) e o uso de aditivos químicos (agentes redutores de água, agentes redutores de contração, agentes expansivos) afetam a retração do concreto.

Desta forma, a retração por secagem é afetada por todos os fatores que influenciam a secagem do concreto, incluindo as características da mistura (tipo e quantidade do aglomerante, o teor de água e a relação água/cimento, quantidade de agregado, a razão entre agregado miúdo e graúdo, tipo de agregado, tamanho do agregado, uso de aditivos e adições), efeito do ambiente (umidade relativa, temperatura), além do efeito do projeto (dosagem e procedimento de

mistura) e a própria construção (período de cura, tamanho e forma do elemento de concreto) (GILBERT; RANZI, 2011; ACI 209).

Nesta seção serão apresentadas a descrição básica de alguns modelos para predição da retração no concreto, na qual a notação usada mantém os símbolos dos documentos originais.

### 2.5.1 NBR 6118 (2014)

A norma prevê que as deformações que são impostas as peças de concreto, como as decorrentes de retração devem ser verificadas. A NBR 6118 (2014) sugere expressões e valores tabelados para a retração que são válidos para concretos plásticos de cimento Portland comum, para temperaturas no concreto entre 10 °C e 20 °C, podendo-se, entretanto, admiti-los como válidos para temperaturas entre 0 °C e 40 °C. Nos casos na qual não é necessário grande precisão da deformação específica de retração do concreto, submetidos a tensões menores que 0,5  $f_c$  quando do primeiro carregamento, a retração pode ser obtida de forma simplificada a partir dos valores disponíveis na Tabela 12, por interpolação.

Tabela 12 - Valores característicos da deformação específica de retração  $\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$

Umidade média ambiente %		40		55		75		90		
Espessura fictícia 2Ac/u (cm)		20	60	20	60	20	60	20	60	
$\varepsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ ‰	$t_0$ dias	5	- 0,53	- 0,47	- 0,48	- 0,43	- 0,36	- 0,32	- 0,18	- 0,15
		30	- 0,44	- 0,45	- 0,41	- 0,41	- 0,33	- 0,31	- 0,17	- 0,15
		60	- 0,39	- 0,43	- 0,36	- 0,40	- 0,30	- 0,31	- 0,17	- 0,15

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

A norma prevê, em casos comuns de obras de concreto armado, em função da restrição à retração do concreto imposta pela armadura, satisfazendo o mínimo especificado nesta norma, o valor de  $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  pode ser considerado igual a  $-15 \times 10^{-5}$ . No entanto, esse valor é válido para elementos estruturais de dimensões usuais, entre 10 cm e 100 cm e para umidade ambiente não inferior a 75 %.

A norma prescreve expressões para determinar a retração do concreto, na qual o valor da retração depende da umidade relativa, consistência do concreto

no lançamento e espessura fictícia da peça. A retração do concreto entre os instantes  $t_0$  e  $t$  é dado por:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty}[\beta_s(t) - \beta_s(t, t_0)] \quad (1)$$

Onde:

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$  é a retração no instante  $t$ , descontada a retração ocorrida até o instante  $t_0$ ;

$t$  é a idade fictícia do concreto no instante considerado, expressa em dias;

$t_0$  é a idade fictícia do concreto no instante em que o efeito da retração na peça começa a ser considerado, expressa em dias;

$\varepsilon_{cs\infty}$  é o valor final da retração, determinado por:

$$\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \cdot \varepsilon_{2s} \quad (2)$$

Em que:

$\varepsilon_{1s}$  é o coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto (Tabela 13);

$\varepsilon_{2s}$  é o coeficiente dependente da espessura fictícia da peça, obtido por:

$$\varepsilon_{2s} = (33 + 2h_{fic}) / (20,8 + 3h_{fic}) \quad (3)$$

$h_{fic}$  é a espessura fictícia, expressa em centímetros (cm):

$$h_{fic} = \frac{2A_c}{u} \quad (4)$$

Na qual:

$A_c$ =área da seção transversal;

$u$ =perímetro da seção em contato com a atmosfera;

$\beta_s(t)$  ou  $\beta_s(t_0)$  é o coeficiente relativo à retração, no instante  $t$  ou  $t_0$ , dado por:

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A\left(\frac{t}{100}\right)^2 + B\left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C\left(\frac{t}{100}\right)^2 + D\left(\frac{t}{100}\right) + E} \quad (5)$$

Na qual tem-se:

$t$ =tempo em dias ( $t \geq 3$  dias);

$$A=40;$$

$$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4,8;$$

$$C = 2,5h^3 - 8,8h + 40,7;$$

$$D = -75h^3 + 585h^2 + 496h - 6,8;$$

$$E = -169h^4 + 88h^3 + 584h^2 - 39h + 0,8.$$

O  $h$  é a espessura fictícia (m) para valores ( $0,05 \leq h \leq 1,6$ ). Os valores que estiverem fora do intervalo deve-se adotar os extremos correspondentes.

Tabela 13– Valores usuais para determinação do coeficiente de retração  $\varepsilon_{1s}$ .

Ambiente	Umidade U (%)	Retração $10^4 \varepsilon_{1s}$		
		Abatimento (cm) conforme ABNT NBR NM 67		
		0-4	5-9	10-15
Ná água	-	+1,0	+1,0	+1,0
Em ambiente muito úmido imediatamente acima da água	90	-1,9	-2,5	-3,1
Ao ar livre, em geral	70	-3,8	-5,0	-6,2
Em ambiente seco	40	-4,7	-6,3	-7,9

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

### 2.5.2 Modelo II (1978)

Neste modelo, a retração do concreto é definida por  $\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0})$  em qualquer tempo  $t$ , tendo a medição estabelecida a partir do início da secagem  $t_{sh,0}$  (NEVILLE; DILGER; BROOKS, 1983), na qual é dada por:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = k_1'' \varepsilon_{sh\infty}'' \left[ \frac{(t - t_{sh,0})}{t^{(1/2)sh} + (t - t_{sh,0})} \right]^{1/2} \quad (6)$$

Onde  $k_1''$  é o coeficiente que depende da umidade relativa  $h$ , sendo determinado por:

$$k_1'' = 1 - 10^{-6} h^3 (h \leq 98\%) \quad (7)$$

$$k_1'' = -0.2 (h = 100\%) \quad (8)$$

A parcela identificada como  $\varepsilon_{sh\infty}(10^{-6})$  significa a retração final e está diretamente relacionada aos parâmetros da mistura pelas seguintes expressões:

$$\varepsilon_{sh\infty} = 1330 - 970y \quad (9)$$

$$y = (390z^{-4} + 1)^{-1} \quad (10)$$

$$z = 0,381(f_{cy}128)^{1/2} \left[ 1,25 \left( \frac{a}{\gamma} \right)^{1/2} + 0,5 \left( \frac{g}{s} \right)^2 \right] \left( \frac{1+s}{\frac{w}{\gamma}} \right)^{1/3} - 12 \quad (11)$$

Sendo que z deve ser > 0, caso contrário z=0.

Na qual, tem-se:

$\frac{a}{\gamma}$  = relação total agregado /cimento;

$\frac{g}{s}$  = relação agregado graúdo/agregado miúdo;

$\frac{s}{\gamma}$  = relação agregado miúdo/cimento;

$\frac{w}{\gamma}$  = relação água/ cimento.

Todas as relações mencionadas são dadas em massa e  $f_{cy}128$  é a resistência após 28 dias (MPa).

A nomenclatura  $t(1/2)_{sh}$  significa a retração na metade do intervalo e é o momento quando  $\varepsilon^2_{sh} = 0,5$ , esse termo depende também do tamanho da peça e é estimado a partir de:

$$t(1/2)_{sh} = 4 \left( k'' \frac{V}{S} \right)^2 \frac{1}{D(t_{sh},0)} \quad (12)$$

Onde  $k''$  é o fator de forma, apresentando os seguintes valores:

$k'' = 1,0$  para uma laje;

$k'' = 1,15$  para um cilindro;

$k'' = 1,25$  para um prisma quadrado;

$k'' = 1,30$  para uma esfera;

$k'' = 1,35$  para um cubo;

$\frac{V}{S}$  é a relação volume / superfície (mm) e  $D(tsh, 0)$  é a difusividade de secagem dada por:

$$D(tsh, 0) = 2.4 + \frac{120}{\sqrt{tsh,0}} \quad (13)$$

### 2.5.3 Modelo B3 (1995)

Este modelo é para concretos que utilizam cimento Portland, considerando intervalos específicos, descritos da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll} 17 \text{ MPa} \leq f'c \leq 70 \text{ MPa} & 2,5 \leq a/c \leq 13,5 \\ 160 \leq c \leq 720 & 0,3 \leq w/c \leq 0,85 \end{array}$$

Sendo que:

$w/c$  relação água/cimento;

$f'c$  resistência à compressão após 28 dias (MPa);

$a/c$  relação agregado/cimento;

$c$  teor de cimento no concreto ( $\text{kg/m}^3$ ).

O modelo não considera a composição do concreto, não contempla concretos especiais que tem em sua composição adições pozolânicas, fibras e aditivos. Devido a isso, existem incertezas na predição da retração, visto que são estimadas a composição do concreto e sua resistência. A retração última é determinada em função do tempo, considerando o módulo de elasticidade que é influenciado pelo teor de água do concreto, bem como a cura utilizada e o tipo de cimento (RILEM 107- IGCS, 1995).

Cabe ressaltar que o modelo foi desenvolvido para o estudo em concretos normais e precisam de algumas alterações e de calibrações dos parâmetros para a utilizações no estudo de outros tipos de concretos (RILEM 107- IGCS, 1995). Entretanto, se o modelo for calibrado por dados experimentais, o mesmo pode ser aplicado mesmo fora desses intervalos, como por exemplo, em concretos de alta resistência e concretos reforçados com fibra (RILEM 107- IGCS, 1995).

Este modelo não descreve bem a retração autógena, e teste de curta duração são recomendados para atualizar os valores dos parâmetros do material (RILEM 107- IGCS, 1995). No entanto, previsões da retração foram comparadas com dados experimentais indicando que a retração pode ser calculada independentemente de quais misturas químicas ou subprodutos minerais estão no concreto, temperatura de hidratação ou regime de cura (BAZANT; BAWEJA, 2001).

A retração média na seção transversal é dada pela expressão:

$$\varepsilon_{sh}(t, tc) = -\varepsilon_{sh,\infty} K_h S(t - tc) \quad (14)$$

Onde:

$\varepsilon_{sh}$  = retração total do concreto no tempo  $t$  ( $10^{-6}$ );

$\varepsilon_{sh,\infty}$  = retração última ( $10^{-6}$ );

$K_h$  = coeficiente que depende da umidade relativa;

$S(t - tc)$  = curva em função do tempo.

O  $K_h$  considera a umidade relativa ( $0 \leq h \leq 1,0$ ), conforme as relações dadas a seguir:

$$K_h = \begin{cases} 1 - h^3 & \text{para } h \leq 0,98 \\ -0,2 & \text{para } h = 1,0 \\ \text{Interpolação linear} & \text{para } 0,98 \leq h \leq 1,0 \end{cases} \quad (15)$$

A curva do tempo é dada:

$$S(t - tc) = \tanh\left(\frac{t - tc}{\tau_{sh}}\right)^{1/2} \quad (16)$$

Na qual:

$t$  = tempo (dias);

$t_c$  = idade quando a secagem começa (dias);

$\tau_{sh}$  = intervalo de retração (dias).

$\tau_{sh}$  depende da dimensão da peça (espessura) conforme expressão:

$$\tau_{sh} = 0,085 t_c^{-0,08} f_{cm}^{-\frac{1}{4}} \left[ 2K_s \left( \frac{v}{s} \right) \right]^2 \quad (17)$$

Onde:

$\frac{v}{s}$  é a relação volume/ superfície;

$f_{cm}$  = resistência aos 28 dias (MPa).

$K_s$  é o fator de forma da seção transversal de acordo com o tipo de elemento, conforme valores dados a seguir:

$$K_s = \begin{cases} 1,00 & \text{para laje infinita} \\ 1,15 & \text{para cilindro infinito} \\ 1,25 & \text{para prisma quadrado infinito} \\ 1,30 & \text{para esfera} \\ 1,55 & \text{para cubo} \end{cases}$$

É permitido aproximar  $K_s=1,0$ .

A retração última ( $\varepsilon_{sh,\infty}$ ) além de depender do tempo, também considera o módulo de elasticidade:

$$\varepsilon_{sh,\infty} = -\varepsilon_{s\infty} \frac{E(7+600)}{E(t_0+\tau_{sh})} \quad (18)$$

Em análise simplificada assume-se:  $\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty}$  com valores de  $\varepsilon_{sh\infty} \cong 300 \cdot 10^{-6}$  até  $1100 \cdot 10^{-6}$ .

Na qual  $\varepsilon_{s\infty}$  é dado por:

$$\varepsilon_{s\infty} = -\alpha_1 \cdot \alpha_2 [0,019w^{2,1}(f_{cm})^{-0,28} + 270]10^{-6} \quad (19)$$

Onde:

$W$  teor de água do concreto ( $\text{kg/m}^3$ );

$\alpha_1$  depende do tipo de cimento, conforme:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1,0 & \text{cimento tipo I} \\ 0,85 & \text{cimento tipo II} \\ 1,1 & \text{cimento tipo III} \end{cases}$$

$\alpha_2$  depende do tipo de cura de acordo com os valores dados a seguir:

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0,75 & \text{cura à vapor/térmica} \\ 1,00 & \text{curado em água ou 100\% de umidade relativa} \\ 1,2 & \text{selado/cura ao ar} \end{cases}$$

O módulo de elasticidade ( $E$ ) em MPa é determinado por:

$$E(t) = E(28) \left( \frac{t}{4+0,85t} \right)^{0,5} \quad (20)$$

Em que  $E(28) = 4738 \sqrt{f_{cm}}$  em MPa.

As expressões representam dependência do tamanho, considerando a espessura efetiva da seção transversal e a relação volume/superfície, além do fator de forma da seção transversal de acordo com o tipo de elemento (laje, cilindro, quadrado, prisma, esfera e cubo). A retração final além de depender do tempo, também considera o módulo de elasticidade, bem como o tipo de cimento e a cura utilizada para aquelas condições. O modelo permite a predição dos parâmetros dos modelos, existindo incertezas, pois estima a composição do concreto e sua resistência.

Bazant e Baweja (2001) analisaram um procedimento para o cálculo da retração do concreto usando as informações disponíveis no projeto: resistência à compressão aos 28 dias, tamanho do elemento e umidade relativa. O método incluiu o desenvolvimento da resistência com a idade e relação entre módulo de elasticidade e resistência para prever a retração utilizando o modelo. De acordo com os autores, os fatores apropriados para o tipo de cimento podem ser melhorados a partir dos dados experimentais da resistência e módulo de elasticidade.

#### **2.5.4 Modelo B4 (2015)**

Este modelo, chamado B4, baseia-se no modelo teórico B3, recomendado pela RILEM de 1995. A RILEM com um novo banco de dados expandido, calibrou o modelo atual B4, resultando em grande melhoria em relação ao modelo B3 (RILEM TC-242, 2015). Com a expansão do banco de dados da RILEM tornou-se possível incluir a retração autógena ao modelo, diferentemente do modelo B3 em que era considerado separadamente, além de possibilitar a consideração de outras influências, como a mineralogia e tipo de agregado, e estender a aplicabilidade do modelo para outros tipos de concretos (RILEM TC-242, 2015). Embora o modelo B4 apresente uma gama de aplicabilidade, existem algumas restrições nos parâmetros para qual o modelo foi calibrado, conforme mostrado a seguir:

$$0,22 \leq w/c \leq 0,87$$

$$1,0 \leq a/c \leq 13,2$$

$$200 \text{ kg/m}^3 \leq c \leq 1500 \text{ kg/m}^3$$

$$15\text{MPa} \leq \overline{f_c} \leq 70\text{MPa}$$

$$-25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 75^{\circ}\text{C}$$

$$20^{\circ}\text{C} \leq T_{cur} \leq 30^{\circ}\text{C}$$

$$12 \leq v/s \leq 120$$

Onde:

$w/c$  relação água/cimento;

$a/c$  relação agregado/cimento;

$c$  teor de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\overline{f_c}$  resistência média aos 28 dias (MPa);

$T$  temperatura do ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{cur}$  temperatura do ambiente durante a cura ( $^{\circ}\text{C}$ );

$v/s$  relação volume/superfície (mm).

A faixa de aplicabilidade do modelo B4 é mais ampla que o modelo B3, devido à calibração do modelo B4 com um extenso banco de dados de várias décadas e com diversas composições (RILEM TC-242, 2015). Na determinação da retração dos concretos normais com alta relação água/cimento tem sido desconsiderado a retração autógena que é geralmente muito pequena. No entanto, os concretos de alta resistência, ou seja, que apresentam baixa relação água/cimento, a retração autógena pode ser significativa.

O modelo B4 divide a retração em duas partes, uma parcela autógena ( $\varepsilon_{au}$ ) e outra parcela de secagem ( $\varepsilon_{sh}$ ). De acordo com a otimização do ajuste utilizando o banco de dados da retração, assume-se que  $\varepsilon_{sh}$  e  $\varepsilon_{au}$  não são correlacionados e podem ser adicionados (RILEM TC-242, 2015), como mostra a equação 21:

$$\varepsilon_{sh,total}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) + \varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) \quad (21)$$

Para o caso, de umidade relativa inicialmente 100% e tempos equivalentes a diferentes temperaturas, considera-se no  $\tilde{t}$  e  $\tilde{t}_0$  o efeito da temperatura na retração, em que  $\tilde{t}$  é a duração de exposição corrigida pela temperatura e  $\tilde{t}_0$  é a idade de exposição corrigida pela temperatura (RILEM TC-242, 2015), na qual:

$$\tilde{t} = (t - t_0)\beta_{TS} \quad (22)$$

Em que:

$t$ =tempo em dias (idade do concreto);

$t_0$ =tempo de exposição no meio ambiente.

$\beta_{TS}$  é determinado por:

$$\beta_{TS} = \exp \left[ \frac{U_S}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T+273} \right) \right] \quad (23)$$

Na qual  $T$  é a temperatura do ambiente ( $C^0$ ),  $U_S$  é a energia de difusão de umidade relacionada a retração por secagem e  $R$  é uma constante do gás.

Considerando o efeito da temperatura no processo de cura e envelhecimento, tem-se:

$$\tilde{t}_0 = t_0 \beta_{Th} \quad (24)$$

$$\beta_{Th} = \exp \left[ \frac{U_h}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_{cur}+273} \right) \right] \quad (25)$$

Na qual  $T_{cur}$  é a temperatura de cura ( $C^0$ ) e pertence  $[20^0C, 30^0C]$ ,  $U_h$  é a energia de ativação de hidratação. Na ausência de dados pode-se utilizar a seguinte relação:

$$\frac{U_h}{R} = \frac{U_S}{R} = 4000K$$

A retração autógena começa no momento da configuração de  $t = 0$ , já a retração por secagem inicia somente após a exposição ao ambiente no tempo  $t_0$ . A parcela da retração por secagem é dada por:

$$\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) K_h S(\tilde{t}) \quad (26)$$

O  $K_h$  considera a umidade relativa ( $0 \leq h \leq 1,0$ ), conforme as relações dadas a seguir:

$$K_h = \begin{cases} 1 - h^3 & \text{para } h \leq 0,98 \\ 12,94(1 - h) - 0,2 & \text{para } 0,98 \leq h \leq 1 \end{cases} \quad (27)$$

Na condição submersa  $K_h = -0,2$  (100%) e na condição de névoa (100%) utiliza-se  $h = 0,98$ .

Na equação 28 é considerada a curva do tempo  $S(\tilde{t})$  que é dada por:

$$S(\tilde{t}) = \tanh \left( \frac{\tilde{t}}{\tau_{sh}} \right)^{1/2} \quad (28)$$

Na qual  $\tau_{sh}$  depende da dimensão da peça (espessura) conforme expressão:

$$\tau_{sh} = \tau_0 K_{\tau a} (K_s D)^2 \quad (29)$$

Onde  $D$  é a espessura efetiva da seção transversal, dada por:

$$D = \frac{2v}{s} \quad (30)$$

Na qual  $\frac{v}{s}$  é a relação volume/ superfície (cm).

$K_s$  é o fator de forma da seção transversal, de acordo com o tipo de elemento conforme valores dados a seguir:

$$K_s = \begin{cases} 1,00 & \text{para laje infinita} \\ 1,15 & \text{para cilindro infinito} \\ 1,25 & \text{para prisma quadrado infinito} \\ 1,30 & \text{para esfera} \\ 1,55 & \text{para cubo} \end{cases}$$

O modelo B4 utiliza uma adaptação do Modelo B3 para correção da retração devido ao efeito da rigidez elástica, através da Equação 29 em que o tipo de agregado é levado em consideração por um fator adimensional  $K_{\tau a}$  que é definido na Tabela 14.

Tabela 14– Parâmetros dependentes do agregado.

Tipo de Agregado	$K_{\tau a}$	$K_{\varepsilon a}$
Diábase	0,06*	0,76*
Quartzito	0,59	0,71
Cálcario	1,80	0,95
Arenito	2,30	1,60
Granito	4,00	1,05
Quartzo diorito	15,00*	2,20*

\*Denotam parâmetros ajustados não definidos, na qual existe detalhes da análise estatística.

Fonte: Hubler *et al.* (2015b).

A retração por secagem considera através de  $\tau_0$  parâmetros que dependem do tipo de cimento, relação água/cimento, agregados/cimento e teor de cimento, conforme expressão mostrada a seguir:

$$\tau_0 = \tau_{cem} \left(\frac{a/c}{6}\right)^{p_{\tau a}} \left(\frac{w/a}{0,38}\right)^{p_{\tau w}} \left(\frac{6,5c}{\rho}\right)^{p_{\tau c}} \quad (31)$$

Na qual:

$\rho$  = densidade do concreto (kg/m<sup>3</sup>);

$\tau_{cem}, p_{\tau a}, p_{\tau w}, p_{\tau c}$  dependem do tipo de cimento (Tabela 15).

Tabela 15 – Parâmetros da retração por secagem dependentes do tipo de cimento: cimento de endurecimento regular (R), cimento de endurecimento rápido (RS) e cimento de endurecimento lento (SL).

Parâmetros	R	RS	SL
$\tau_{cem}$	0,016	0,080	0,010
$p_{\tau a}$	-0,33	-0,33	-0,33
$p_{\tau w}$	-0,06	-2,40	3,55
$p_{\tau c}$	-0,10	-2,70	3,80
$\varepsilon_{cem}$	$360 \times 10^{-6}$	$860 \times 10^{-6}$	$410 \times 10^{-6}$
$p_{\varepsilon a}$	-0,80	-0,80	-0,80
$p_{\varepsilon w}$	1,10	-0,27	1,00
$p_{\varepsilon c}$	0,11	0,11	0,11

Fonte: RILEM TC-242 (2015).

A parcela  $\varepsilon_{sh\infty}$  é referente a retração por secagem final e dada por:

$$\varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) = -\varepsilon_0 K_{\varepsilon a} \frac{E(7\beta_{Th} + 600\beta_{Ts})}{E(\tilde{t}_0 + \tau_{sh}\beta_{Ts})} \quad (32)$$

Em que  $K_{\varepsilon a}$  é o fator que leva em consideração o tipo de agregado (Tabela 14) e pode ser considerado 1,00 se não houver informações sobre o tipo de agregado. O módulo de elasticidade (E) em MPa é determinado através da expressão dada na Equação 20.

O  $\varepsilon_0$  depende do tipo de cimento, relação água/cimento, agregados/cimento e teor de cimento, conforme expressão mostrada a seguir:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a/c}{6}\right)^{p_{\varepsilon a}} \left(\frac{w/a}{0,38}\right)^{p_{\varepsilon w}} \left(\frac{6,5c}{\rho}\right)^{p_{\varepsilon c}} \quad (33)$$

Na qual  $\varepsilon_{cem}, p_{\varepsilon a}, p_{\varepsilon w}, p_{\varepsilon c}$  são fatores que dependem do tipo de cimento (Tabela 15).

A função empírica que representa a retração autógena aproxima-se do resultado de um grande número de reações químicas entre os constituintes da mistura, dando uma boa estimativa da magnitude e evolução da contribuição da parcela da retração autógena para a retração total (RILEM TC-242, 2015). A expressão considera a relação água/cimento e agregado/cimento, na qual possuem parâmetros e expoentes obtidos em tabela, conforme expressões dadas a seguir:

$$\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{au\infty} \left[ 1 + \left( \frac{\tau_{au}}{t + t_0} \right)^\alpha \right]^{r_t} \quad (34)$$

Na qual  $\alpha = r_\alpha \left( \frac{w/c}{0,38} \right)$ , sendo  $\varepsilon_{au\infty}$  a parcela da retração autógena final dada por:

$$\varepsilon_{au\infty} = -\varepsilon_{au,cem} \left( \frac{a/c}{6} \right)^{r_{\varepsilon a}} \left( \frac{w/c}{0,38} \right)^{r_{\varepsilon w}} \quad (35)$$

E a parcela da retração autógena no tempo dado por:

$$\tau_{au} = \tau_{au,cem} \left( \frac{w/c}{0,38} \right)^{r_{\tau w}} \quad (36)$$

Sendo os parâmetros  $\varepsilon_{au,cem}$ ,  $\tau_{au,cem}$ , bem como os expoentes  $r_t$ ,  $r_\alpha$ ,  $r_{\varepsilon a}$ ,  $r_{\varepsilon w}$  e  $r_{\tau w}$  obtidos da Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros da retração autógena dependentes do tipo de cimento: cimento de endurecimento regular (R), cimento de endurecimento rápido (RS) e cimento de endurecimento lento (SL).

Parâmetros	R	RS	SL
$\tau_{au,cem}$	1,00	1,0	1,00
$r_{\tau w}$	3,00	3,00	3,00
$r_t$	-4,50	-4,50	-4,50
$r_\alpha$	1,00	1,40	1,00
$\varepsilon_{au,cem}$	$210 \times 10^{-6}$	$-84 \times 10^{-6}$	$0 \times 10^{-6}$
$r_{\varepsilon a}$	-0,75	-0,75	0,75
$r_{\varepsilon w}$	-3,50	-3,50	-3,50

Fonte: RILEM TC-242 (2015).

Cabe ressaltar que no caso de misturas com aditivos e adições, uma série de reações químicas e interações podem afetar a mudança de volume. Na

ausência de um modelo químico completo, o efeitos de aditivos e adições específicas e suas interações foram classificados empiricamente (RILEM TC-242, 2015), e os valores ajustados de acordo com a Tabela 17.

Tabela 17 – Fatores de escala dos parâmetros dependentes da classe (aditivos e adições).

Classe (% de c)	$\tau_{cem}$	$\varepsilon_{au,cem}$	$r_{ew}$	$r_{\alpha}$
Re ( $\leq 0,5$ ), Fly ( $\leq 15$ )	6,00	0,58	0,50	2,60
Re ( $> 0,5, \leq 0,6$ ), Fly ( $\leq 15$ )	2,00	0,43	0,59	3,10
Re ( $> 0,5, \leq 0,6$ ), Fly ( $> 15, \leq 30$ )	2,10	0,72	0,88	3,40
Re ( $> 0,5, \leq 0,6$ ), Fly ( $> 30$ )	2,80	0,87	1,60	5,00
Re ( $> 0,6$ ), Fly ( $\leq 15$ )	2,00	0,26	0,22	0,95
Re ( $> 0,6$ ), Fly ( $> 15, \leq 30$ )	2,10	1,10	1,10	3,30
Re ( $> 0,6$ ), Fly ( $> 30$ )	2,10*	1,10	0,97	4,00
Fly ( $\leq 15$ ), Super ( $\leq 5$ )	0,32	0,71	0,55	1,71
Fly ( $\leq 15$ ), Super ( $> 5$ )	0,32*	0,55	0,92	2,30
Fly ( $> 15, \leq 30$ ), Super ( $\leq 5$ )	0,50	0,90	0,82	1,25
Fly ( $> 15, \leq 30$ ), Super ( $> 5$ )	0,50*	0,80	0,80	2,81
Fly ( $> 30$ ), Super ( $\leq 5$ )	0,63	1,38	0,00	1,20
Fly ( $> 30$ ), Super ( $> 5$ )	0,63*	0,95	0,76	3,11
Super ( $\leq 5$ ), Sílica ( $\leq 8$ )	6,00	2,80	0,29	0,21
Super ( $\leq 5$ ), Sílica ( $\geq 8$ )	3,00	0,96	0,26	0,71
Super ( $\geq 5$ ), Sílica ( $\leq 8$ )	8,00	1,95	0,00	1,00
Sílica ( $\leq 0,8$ )	1,90	0,47	0,00	1,20
Sílica ( $> 8, \leq 18$ )	2,60	0,82	0,00	1,20
Sílica ( $> 18$ )	1,00	1,50	5,00	1,00
AEA ( $\leq 0,05$ )	2,30	1,10	0,28	0,35
AEA ( $> 0,05$ )	0,44	4,28	0,00	0,36
WR ( $\leq 2$ )	0,50	0,38	0,00	1,90
WR ( $> 2, \leq 3$ )	6,00	0,45	1,51	0,30
WR ( $> 3$ )	2,40	0,40	0,68	1,40

\*Falta de dados, valor assumido. (Re=aditivo retardador; Fly = fly ash (cinza volante); Super=aditivo superplastificante; Sílica (sílica ativa); AEA= aditivo incorporador de ar; WR=aditivo redutor de água).

Fonte: RILEM TC-242 (2015).

Na etapa de projeto, é necessário estimar a fluência e retração, no entanto, muitas vezes a composição do concreto para a estrutura ainda não foi determinada. Desta forma, através de otimização estatística e ajuste com banco de dados obteve-se uma expressão simplificada na qual obtêm-se a retração através da resistência média:

$$\bar{f}_c \cong f'_c + 8,3 \text{ ou } \bar{f}_c \cong f'_c + 8 \text{ [MPa]} \quad (37)$$

Onde:

$\bar{f}_c$  = resistência média aos 28 dias;

$f'_c$  = resistência de projeto aos 28 dias.

Utilizando os valores da resistência média, obtêm-se os parâmetros da retração por secagem:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{s,cem} \left( \frac{\bar{f}_c}{40} \right)^{S_{\varepsilon f}} \quad (38)$$

$$\tau_0 = \tau_{s,cem} \left( \frac{\bar{f}_c}{40} \right)^{S_{\tau f}} \quad (39)$$

Na qual determina-se os coeficientes através da Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros da retração por secagem para o cimento de endurecimento regular (R), cimento de endurecimento rápido (RS) e cimento de endurecimento lento (SL).

Parâmetros	R	RS	SL
$\tau_{s,cem}$	0,027	0,027	0,032
$S_{\tau f}$	0,21	1,55	-1,84
$\varepsilon_{s,cem}$	$590 \times 10^{-6}$	$830 \times 10^{-6}$	$640 \times 10^{-6}$
$S_{\varepsilon f}$	-0,51	-0,84	-0,69

Fonte: RILEM TC-242 (2015).

De forma semelhante a retração por secagem, é possível determinar a retração autógena através da seguinte relação:

$$\varepsilon_{au\infty} = -\varepsilon_{au,cem} \left( \frac{\bar{f}_c}{40} \right)^{r_{\varepsilon f}} \quad (40)$$

Os parâmetros relacionados a retração autógena são obtidos através da tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros da retração autógena para o cimento de endurecimento regular (R), cimento de endurecimento rápido (RS) e cimento de endurecimento lento (SL).

Parâmetros	R, RS, SL
$\tau_{au,cem}$	2,26
$r_{\tau f}$	0,27
$r_t$	-1,73
$r_{\varepsilon f}$	1,03

Parâmetros	R, RS, SL
$\varepsilon_{au,cem}$	$78,2 \times 10^{-6}$
$\alpha_s$	1,73

Fonte: RILEM TC-242 (2015).

### 2.5.5 Modelo CEB-FIP (1990)

A retração total é determinada através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{cs}(t, ts) = \varepsilon_{cs0} \beta_s(t - ts) \quad (41)$$

A expressão é válida para concretos com  $f_{ck}$  nos seguintes intervalos  $12 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 80 \text{ MPa}$ , taxa de umidade relativa de 40% até 100% e temperaturas de  $5^\circ\text{C}$  até  $30^\circ\text{C}$ . O modelo considera a variável tempo, resistência, tipos de cimento, umidade relativa e dimensões da peça (CEB, 1990).

O valor de  $\beta_s$  é determinado por:

$$\beta_s(t - ts) = \left[ \frac{(t-ts)/t_1}{350 \left(\frac{h}{h_0}\right)^2 + (t-ts)/t_1} \right]^{0,5} \quad (42)$$

Onde:

$t_1=1$  dias;

$h_0=100$  mm;

$t=$  idade do concreto (dias);

$t_s=$  idade do concreto (dias) que inicia a retração;

$h = 2A_c/u$  é relacionado ao tamanho da peça (mm), onde  $A_c$  é a seção transversal ( $\text{mm}^2$ ) e  $u$  é o perímetro da peça em contato com a atmosfera (mm);

$\varepsilon_{cs0}$  é o coeficiente de retração dado por:

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (43)$$

$\varepsilon_s(f_{cm})$  é determinado através da equação a seguir:

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[ 160 + 10\beta_{sc} \left( 9 - \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] 10^{-6} \quad (44)$$

Na qual:

$f_{cm}$ = resistência do concreto aos 28 dias (MPa);

$f_{cm0}=10$ MPa.

$\beta_{SC}$  é um coeficiente que depende do tipo de cimento, sendo considerado 4 para cimentos com endurecimento lento, 5 para cimentos com endurecimento normal ou rápido e 8 para endurecimento rápido e cimento de alta resistência (CEB, 1990).

$\beta_{RH}$  é um coeficiente que depende da umidade relativa dada por:

$$\beta_{RH} = -1,55 \beta_{SRH} \text{ para } 40\% \leq RH \leq 99\% \quad (45)$$

$$\beta_{RH} = 0,25 \text{ para } RH \geq 99\% \quad (46)$$

Onde  $\beta_{SRH}$  é dado por:

$$\beta_{SRH} = 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \quad (47)$$

Na qual:

RH é a umidade relativa em %;

RH<sub>0</sub> é igual a 100%.

### 2.5.6 Modelo CEB-FIB (2010)

A retração total é obtida através da seguinte relação:

$$\varepsilon_{cs}(t, ts) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, ts) \quad (48)$$

Na qual existe a parcela da retração autógena  $\varepsilon_{cbs}(t)$ , que ocorre sem perda de umidade para o ambiente e a retração por secagem  $\varepsilon_{cds}(t, ts)$  que é em decorrência da perda de umidade.

Na retração autógena o modelo considera a idade do concreto, a resistência à compressão média aos 28 dias em MPa, além de um coeficiente que depende do tipo de cimento (FIB, 2013). Tem-se que:

$$\varepsilon_{cbs}(t) = \varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) \cdot \beta_{bs}(t) \quad (49)$$

O componente básico de retração  $\varepsilon_{cbs}(t)$  pode ser estimado por meio do coeficiente de retração de secagem teórico  $\varepsilon_{cbs0}(f_{cm})$  e da função de tempo  $\beta_{bs}(t)$  (FIB, 2013), dados por:

$$\beta_{bs}(t) = 1 - \exp(-0,2\sqrt{t}) \quad (50)$$

$$\varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) = -\alpha_{bs} \left( \frac{0,1f_{cm}}{6+0,1f_{cm}} \right)^{2,5} 10^{-6} \quad (51)$$

Onde:

$f_{cm}$  é a resistência à compressão média aos 28 dias em MPa;

$\alpha_{bs}$  é um coeficiente que depende do tipo de cimento;

$t$  é a idade do concreto (dias).

Na parcela da retração por secagem, além de considerar todos os parâmetros da retração autógena, também considera-se a idade do começo da secagem, bem como a duração da mesma, levando em conta o efeito da umidade relativa do ambiente. O tamanho do elemento é considerado através da seção transversal e do perímetro da peça em contato com a atmosfera (FIB, 2013), conforme expressão dada a seguir:

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (52)$$

Onde:

$t$  é a idade do concreto (dias);

$t_s$  é a idade do começo de secagem do concreto (dias);

$(t - t_s)$  é a duração da secagem (dias).

A retração por secagem  $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$  é calculada por meio do coeficiente de retração por secagem teórico  $\varepsilon_{cds0}(f_{cm})$ , o coeficiente  $\beta_{RH}(RH)$  considera o efeito da umidade relativa do ambiente e a função  $\beta_{ds}(t - t_s)$  descreve o comportamento ao longo do tempo (FIB, 2013), conforme mostrado a seguir:

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6} \quad (53)$$

Na qual  $f_{cm}$  é a resistência em 28 dias em MP e  $\alpha_{ds1}$ ,  $\alpha_{ds2}$  são coeficientes dependentes do tipo de cimento, conforme Tabela 20.

Tabela 20 – Fatores que correlacionam o tipo de cimento.

Classe de Resistência do Cimento	$\alpha_{ds1}$	$\alpha_{ds2}$
32,5N	3	0,013
32,5R; 42,5N	4	0,012
42,5R; 52,5N; 52,5R	6	0,012

Fonte: FIB (2013).

O coeficiente que depende da umidade  $\beta_{RH}(RH)$  é dado por:

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right] & \text{para } 40 \leq RH < 99\% \cdot \beta_{s1} \\ 0,25 & \text{para } RH \geq 99\% \cdot \beta_{s1} \end{cases} \quad (54)$$

Onde RH é umidade relativa do ambiente dada em porcentagem (%) e  $\beta_{s1}$  é obtido por:

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,1} \leq 1,0 \quad (55)$$

O fator  $\beta_{ds}(t - ts)$  que considera a variável tempo é obtido através da seguinte expressão:

$$\beta_{ds}(t - ts) = \left(\frac{(t-ts)}{0,035 \cdot h^2 + (t-ts)}\right)^{0,5} \quad (56)$$

Na qual  $h = 2Ac/u$  é relacionado ao tamanho da peça (mm), onde  $Ac$  é a seção transversal (mm<sup>2</sup>) e  $u$  é o perímetro do membro em contato com a atmosfera (mm) (FIB, 2013). É importante salientar que as expressões desenvolvidas por este modelo foram com base em resultados experimentais principalmente em concretos com cimentos CEM I e CEM II (FIB, 2013).

### 2.5.7 Modelo Gardner (2004)

Segundo Gardner (2004), a retração por secagem pode ser estimada através da expressão:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{shu} \beta(h) \beta(t) \quad (57)$$

O modelo considera o tipo de cimento, a resistência, a umidade, o tempo e as dimensões da peça.  $\varepsilon_{sh}$  é a retração total do concreto e  $\varepsilon_{shu}$  é a retração última, que depende do tipo de cimento e da resistência média à compressão do concreto a 28 dias em MPa ( $f_{cm28}$ ), conforme expressão dada a seguir:

$$\varepsilon_{shu} = 900K \left(\frac{30}{f_{cm28}}\right)^{0,5} 10^{-6} \quad (58)$$

Utiliza-se  $K=1,00$  para cimento tipo I,  $K=0,75$  para cimento tipo II e  $K=1,15$  para cimento tipo III. No caso de concreto contendo cinzas volantes, sílica ativa

ou escória, deve-se determinar as resistências do concreto para ajustar o valor que melhor represente K (GARDNER, 2004).

$\beta(h)$  é coeficiente de correção que considera o efeito da umidade relativa na retração, conforme exposto:

$$\beta(h) = (1 - 1,18 \cdot h^4) \quad (59)$$

Sendo h a umidade (%).

$\beta(t)$  é um fator que depende do tempo, sendo obtido pela seguinte expressão:

$$\beta(t) = \left( \frac{t-t_c}{t-t_c+0,12(V/S)^2} \right)^{0,5} \quad (60)$$

Na qual t é a idade do concreto (dias) e  $t_c$  o tempo do ensaio (dias) e V/S é a relação entre o volume e a área superficial (mm).

### 2.5.8 Modelo ACI (1978)

O modelo de predição de retração ACI (1978) inicialmente leva em consideração o tipo de cura utilizado para a peça de concreto quantificando a retração no tempo (t) após início da secagem ( $t_{sh,0}$ ), através das seguintes equações (NEVILLE; DILGER; BROOKS, 1983):

Para cura úmida:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = \frac{(t - t_{sh,0})}{35 + (t - t_{sh,0})} \cdot \varepsilon_{sh\infty} \quad (61)$$

Para cura a vapor:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_{sh,0}) = \frac{(t - t_{sh,0})}{55 + (t - t_{sh,0})} \cdot \varepsilon_{sh\infty} \quad (62)$$

Onde  $\varepsilon_{sh}$  é a retração em  $10^{-6} \text{ mm/mm}$  e  $\varepsilon_{sh\infty}$  é a retração final, sendo essa definida por:

$$\varepsilon_{sh\infty} = 780 \times 10^{-6} \kappa_5' \kappa_1' \kappa_4' \kappa_3' \kappa_6' \kappa_8' \kappa_7' \quad (63)$$

Onde os coeficientes  $\kappa_1'$ ,  $\kappa_3'$ ,  $\kappa_4'$ ,  $\kappa_5'$ ,  $\kappa_6'$ ,  $\kappa_7'$  e  $\kappa_8'$  representam, respectivamente, a umidade relativa, o abatimento do concreto fresco, espessura da peça, período de cura (idade da retração), relação agregado miúdo e total de agregado, teor de ar e teor de cimento (NEVILLE; DILGER; BROOKS, 1983).

A idade de retração é um parâmetro considerado no modelo ACI (1978) onde o mesmo é obtido através do coeficiente  $\kappa'_5$  que varia de 1,2 até 0,75 de acordo com o período de cura, de 1 a 90 dias para cura úmida, conforme Tabela 21. Tratando-se de cura a vapor, o modelo leva em consideração um período de 1 a 3 dias, fixando um valor único para esta condição de cura ( $\kappa'_5 = 1$ ) (NEVILLE; DILGER; BROOKS, 1983).

Tabela 21 – Coeficiente de idade para determinação da retração.

Período de cura úmida (dias)	Coeficiente de idade de retração
1	1,2
3	1,1
7	1,0
14	0,93
28	0,86
90	0,75

Fonte: Neville, Dilger e Brooks (1983).

O parâmetro de umidade relativa dado por  $\kappa'_1$ , obedece aos limites de 40% e 100%, na qual a umidade relativa ( $h$ ) é dada em porcentagem, conforme:

$$\kappa'_1 = 1,40 - 0,010h ; (40\% \leq h \leq 80\%) \quad (64)$$

$$\kappa'_1 = 3,00 - 0,030h ; (80\% \leq h \leq 100\%) \quad (65)$$

O coeficiente relacionado a espessura da peça  $\kappa'_4$  pode ser determinado considerando a espessura média da peça ou através da relação volume/superfície. Na espessura média, os valores variam de 1,35 a 1,00 para espessura média de 50mm até 150 mm, respectivamente, conforme Tabela 22.

Tabela 22– Coeficientes para a espessura média do membro.

Espessura média	Coeficiente de retração
50	1,35
75	1,25
100	1,17
125	1,08
150	1,00

Fonte: Neville, Dilger e Brooks (1983).

Para espessuras médias entre 150 mm e 380 mm:

$$\kappa'_4 = 1,23 - 0,0015d ; (t - t_{sh,0}) \leq 1 \text{ ano} \quad (66)$$

$$\kappa_4' = 1,17 - 0,0015d ; (t - t_{sh,0}) > 1 \text{ ano} \quad (67)$$

Onde  $d$  = a espessura média do membro de concreto sob consideração (mm).

A relação volume/superfície (V/S) é válida para espessuras superiores a 380 mm. Nesse caso, o coeficiente  $\kappa_4'$  é definido pela equação:

$$\kappa_4' = 1,2e^{-0,00473(\frac{V}{S})} \quad (68)$$

Os coeficientes  $\kappa_3'$  e  $\kappa_6'$ , são obtidos considerando o abatimento do concreto no estado fresco e a relação agregado miúdo/total de agregado, respectivamente, através das seguintes equações:

$$\kappa_3' = 0,89 + 0,00264S_f \quad (69)$$

Onde  $S_f$  = abatimento do concreto (mm).

$$\kappa_6' = 0,30 + 0,0014F \quad (F \leq 50\%) \quad (70)$$

$$\kappa_6' = 0,90 + 0,002F \quad (F > 50\%) \quad (71)$$

Na qual  $F$  = agregado miúdo/ total do agregado (%).

O teor de cimento também é considerado por  $\kappa_8'$ , conforme:

$$\kappa_8' = 0,75 + 0,00061\gamma \quad (72)$$

Cujo  $\gamma$  = teor de cimento (kg/ m<sup>3</sup>).

O teor de ar presente no concreto para os cimentos tipos I e III, é dado por:

$$\kappa_7' = 0,95 + 0,008A \quad (73)$$

Onde  $A$  = teor de ar (%), tendo seus valores dependentes da cura, se a vapor ou úmida. No caso da cura úmida, esse valor é igual a 4,00 para cimento tipo I e 2,30 para cimento tipo III. Já No caso da cura a vapor, esse valor é igual a 1,00 para cimento tipo I e 0,70 para cimento tipo III.

### 2.5.9 Modelo ACI (1992)

A abordagem do modelo consiste em condições padrão que são corrigidos por fatores de correção aplicados nos valores finais de retração (ACI, 2008). O modelo determina a retração utilizando a seguinte equação:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t-t_c)^\alpha}{f+(t-t_c)^\alpha} \cdot \varepsilon_{shu} \quad (74)$$

Onde:

$f$  (dias) e  $\alpha$  são considerados constantes para um determinado tamanho da peça de concreto;

$\varepsilon_{shu}$  é a retração máxima;

$(t - t_c)$  é o período desde início e fim da cura.

O modelo considera situações onde há a ausência de medidas específicas, dados de retração e condições do ambiente, ou seja, utiliza as condições padrão adotando valores médios. Na qual, para a umidade adota 40% definindo assim a retração igual a  $\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6} \frac{mm}{mm}$  (ACI, 2008).

Para as variáveis  $f$  e  $\alpha$  o modelo recomenda um valor médio para  $f$  de 35 a 55 por 7 dias de cura úmida e 1 a 3 dias de cura a vapor, respectivamente. Já para  $\alpha$  é adotado um valor médio de 1,00, que representa uma hipérbole mais plana. Neste caso, o modelo considera as variáveis como constantes, independente da peça e do seu tamanho.

O efeito da forma e do tamanho pode ser representado utilizando o valor de  $\alpha = 1,00$  e a equação dada por:

$$f = 26,0 e^{\left\{1,42 \times 10^{-2} \left(\frac{V}{S}\right)\right\}} \quad (75)$$

Na qual  $\frac{V}{S}$  é a relação volume/superfície em mm.

Para situações diferentes, não padronizadas, o valor de retração final é ponderado por fatores de correção. O modelo recomenda multiplicar o valor  $\varepsilon_{shu}$  por sete fatores que dependem das diferentes condições de projeto (ACI, 2008). Com isso, define-se a retração última utilizando a seguinte equação:

$$\varepsilon_{shu} = 780 \gamma_{sh} \times 10^{-6} \frac{mm}{mm} \quad (76)$$

Onde  $\gamma_{sh}$  representa o produto de todos os fatores que influenciam no valor de retração dado por:

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,t_c} \gamma_{sh,RH} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha} \quad (77)$$

Onde os coeficientes  $\gamma_{sh,t_c}$ ,  $\gamma_{sh,RH}$ ,  $\gamma_{sh,vs}$ ,  $\gamma_{sh,s}$ ,  $\gamma_{sh,\psi}$ ,  $\gamma_{sh,c}$ ,  $\gamma_{sh,\alpha}$ , representam, respectivamente, tipo e período de cura, umidade relativa, espessura da peça de concreto, abatimento do concreto fresco, relação agregado miúdo/ total de agregado, teor de cimento e teor de ar.

O coeficiente  $\gamma_{sh,t_c}$  é obtido de acordo com o período e tipo de cura, se úmida ou a vapor conforme Tabela 23. Tratando-se de cura a vapor, o modelo fixa  $\gamma_{sh,t_c} = 1$  para períodos de 1 a 3 dias (ACI, 2008).

Tabela 23 - Fatores de correção da retração para cura úmida.

Duração da cura úmida $t_c$ (dias)	$\gamma_{sh,t_c}$
1	1,2
3	1,1
7	1,0
14	0,93
28	0,86
90	0,75

FONTE: ACI (2008).

Estes valores de correção são obtidos através de análise de regressão linear, conforme a equação mostrada a seguir:

$$\gamma_{sh,t_c} = 1,202 - 0,2337 \log(t_c) \quad R^2 = 0,9987 \quad (78)$$

O coeficiente  $\gamma_{sh,RH}$  é determinado considerando a umidade relativa do ambiente conforme exposto:

$$\gamma_{sh,RH} = \begin{cases} 1,40 - 1,02h ; 0,40 \leq h \leq 0,80 \\ 3,00 - 3,0h ; 0,80 \leq h \leq 1 \end{cases} \quad (79)$$

Na qual  $h$  é igual à umidade relativa em número decimal. Segundo o modelo, para umidades inferiores a 40%, o coeficiente  $\gamma_{sh,RH}$  deve ser superior à 1,0 (ACI, 2008).

O coeficiente  $\gamma_{sh,vs}$  que tem como parâmetro o tamanho da peça de concreto, utiliza as condicionantes em termos de relação volume/superfície ou es-

espessura média, na qual a espessura média é definida como quatro vezes a relação volume-superfície ( $4V/S$ ) (ACI, 2008). De acordo com ACI (2008) nas peças com relação volume/superfície superior a 38 mm ou espessura média diferente de 150 mm, o modelo considera a seguinte equação:

$$\gamma_{sh,vs} = 1,2e^{\left\{-0,00472\left(\frac{V}{S}\right)\right\}} \quad (80)$$

Onde  $V$  é igual ao volume do espécime em  $\text{mm}^3$  e  $S$  é a sua área superficial em  $\text{mm}^2$ .

O modelo utiliza para peças com espessura média inferior a 150 mm ou relação volume-superfície inferior a 37,5 mm, o valor  $\gamma_{sh,vs}$  definido segundo a Tabela 24.

Tabela 24 – Fator de correção de retração relacionada a espessura da peça.

Espessura média (mm)	Relação volume/superfície (mm)	$\gamma_{sh,vs}$
51	12,5	1,35
76	19	1,25
102	25	1,17
127	31	1,08
152	37,5	1,00

FONTE: ACI (2008).

Tratando-se de elementos com espessuras maiores que 150 mm e inferiores a 380 mm o modelo considera o período de secagem que a peça foi submetida. Durante o primeiro ano de secagem, ou seja  $(t - t_c) \leq 1$  ano, tem-se:

$$\gamma_{sh,vs} = 1,23 - 0,006 \left(\frac{V}{S}\right) \quad (81)$$

Para valores finais,  $(t - t_c) > 1$  ano:

$$\gamma_{sh,vs} = 1,17 - 0,00456 \left(\frac{V}{S}\right) \quad (82)$$

Em relação à composição do concreto, o modelo considera os parâmetros de abatimento no estado fresco, porcentagem de agregado miúdo, teor de cimento e teor de ar. Na qual o coeficiente de correção relacionado ao abatimento é obtido pela equação:

$$\gamma_{sh,s} = 0,89 + 0,00161s \quad (83)$$

Onde  $s$  é a medida de abatimento em milímetros.

No coeficiente que considera o teor de agregado, o modelo utiliza a relação de agregado miúdo pelo total de agregado presente na composição do concreto, conforme mostrado a seguir:

$$\gamma_{sh,\psi} = 0,30 + 0,014\psi ; \psi \leq 50\% \quad (84)$$

$$\gamma_{sh,\psi} = 0,90 + 0,002\psi ; \psi > 50\% \quad (85)$$

Onde  $\psi$  = relação agregado miúdo / total de agregado em porcentagem.

O coeficiente de correção que considera o cimento utilizado é representado pela equação dada a seguir:

$$\gamma_{sh,c} = 0,75 + 0,00061c \quad (86)$$

Onde  $c$  = teor de cimento em  $\text{kg/m}^3$ .

Para o teor de ar, o modelo considera a equação abaixo, sendo o teor de ar ( $\alpha$ ) expresso em porcentagem:

$$\gamma_{sh,\alpha} = 0,95 + 0,008\alpha \geq 1 \quad (87)$$

Contudo, os fatores de correção devem ser utilizados quando os mesmos apresentam aproximação com os valores médios sugeridos para uma retração considerada padrão, ou seja,  $\varepsilon_{shu} = 780 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$  (ACI, 2008). Cabe ressaltar, que o valor de  $\varepsilon_{shu}$  deve ser utilizado apenas nos casos de ausência de dados específicos de retração e das condições ambientais conforme ASTM C512.

### 2.5.10 Eurocode 2 (2008)

Neste modelo a retração total é composta pela parcela de retração por secagem e da retração autógena. A parcela da retração autógena é uma função linear da resistência do concreto, a mesma se desenvolve durante o endurecimento do concreto, tendo sua parcela significativa nos primeiros dias após a moldagem (EN-1992-1-1, 2008). O valor da retração total é dado por:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (88)$$

Onde:

$\varepsilon_{cs}$  = retração total;

$\varepsilon_{cd}$  = retração por secagem;

$\varepsilon_{ca}$  = retração autógena.

A deformação devido a retração por secagem ao longo do tempo é determinada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (89)$$

Na qual  $k_h$  é um coeficiente que depende da espessura fictícia da peça ( $h_0$ ) de acordo com a Tabela 25. Em que  $h_0$ , a espessura fictícia do elemento de concreto (mm) é dada por:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} \quad (90)$$

Onde  $A_c$  é a área da seção transversal do concreto (mm<sup>2</sup>) e  $u$  o perímetro (mm) da seção transversal que está exposta a secagem.

Tabela 25 – Valores de  $k_h$ .

$h_0$ (mm)	$k_h$
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥500	0,70

FONTE: EN-1992-1-1, 2008.

A função do tempo é dada por:

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s) + 0,04 \sqrt{h_0^3}} \quad (91)$$

Na qual:

$t$  = idade do concreto (dias);

$t_s$  = idade do concreto no início da secagem (dias).

A retração por secagem básica ( $\varepsilon_{cd,0}$ ) é obtida através da expressão:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[ (220 + 110\alpha_{ds1}) e^{\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right)} \right] 10^{-6} \beta_{RH} \quad (92)$$

Sendo:

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (93)$$

Onde:

$f_{cm}$  = resistência à compressão média aos 28 dias (MPa);

$f_{cm0}$  = 10 MPa;

$\alpha_{ds1}$  e  $\alpha_{ds2}$  são coeficientes que dependem do tipo de cimento, conforme Tabela 26;

$RH$  = umidade relativa do ambiente (%);

$RH_0$  = 100%.

Tabela 26 – Coeficientes de acordo com o tipo de cimento.

Tipo de Cimento	$\alpha_{ds1}$	$\alpha_{ds2}$
Classe S	3	0,13
Classe N	4	0,12
Classe R	6	0,11

FONTE: EN-1992-1-1, 2008.

A retração autógena é dada por:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (94)$$

O coeficiente de retração autógena é dado por:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 (f_{ck} - 10) 10^{-6} \quad (95)$$

A função do tempo é dada por:

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5}) \quad (96)$$

Onde:

$t$  = idade do concreto (dias);

$f_{ck}$  = resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias (MPa).

### 2.5.11 Seara-Paz *et al.* (2016)

Seara-Paz *et al.* (2016) analisaram a relação da retração teórica/retração experimental do concreto convencional com aqueles obtidos para o concreto

com agregado reciclado. Com a introdução do agregado reciclado no concreto, ocorre um aumento da deformação de retração, diminuindo essa relação conforme aumenta o teor de substituição, isto não é previsto pelos modelos teóricos existentes.

Com intuito de adequar a previsão do comportamento à retração do concreto com agregado reciclado, Seara-Paz *et al.* (2016) propôs a utilização de um coeficiente de correção para retração por secagem ( $\varepsilon_{sh,code}$ ) obtido a partir do modelo teórico. Este considera a relação entre a retração do concreto convencional obtida com o modelo teórico ( $\varepsilon_{sh,c,con}$ ) e a retração obtida experimentalmente ( $\varepsilon_{sh,e,con}$ ). Assim, a função proposta pelos autores para corrigir o modelo teórico é composta por dois termos, conforme mostrado a seguir:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (97)$$

Na qual:

$$K_1 = \overbrace{(1 + 0.44 \cdot RCA)}^{1st \ term} \quad (98)$$

$$K_2 = \overbrace{(e^{0.01 \cdot RCA [1 - (90/t)^{(1.82 - 1.04 \cdot RCA)}]})}^{2st \ term} \quad (99)$$

O primeiro termo  $K_1$  aumenta o valor da retração devido à porcentagem de agregado graúdo reciclado ( $RCA = \text{agregado reciclado\%/100}$ ) usado, e o segundo termo  $K_2$  ajusta o primeiro termo ao longo do tempo, reduzindo-o durante os primeiros 90 dias. Este segundo termo depende do tempo, considerando que a razão retração teórica / retração experimental obtido de acordo com diferentes códigos ao longo do tempo, especialmente durante os primeiros 90 dias.

A correção dos valores teóricos dos modelos é realizada através do coeficiente de correção, obtendo assim a expressão modificada para determinar a retração do concreto com agregado graúdo reciclado com o mesmo grau de aproximação dos concretos com agregado natural:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} (1 + 0.44 \cdot RCA) \left( e^{0.01 \cdot RCA [1 - (90/t)^{(1.82 - 1.04 \cdot RCA)}]} \right) \quad (100)$$

Onde:

$RCA = \text{agregado reciclado\%/100}$ ;

$t = \text{idade do concreto (dias)}$ ;

$\varepsilon_{sh,code}$  são os valores teóricos da retração obtidos com expressões propostas por modelos.

O modelo modificado foi validado com resultados experimentais de outros autores para o concreto com agregado graúdo reciclado. No entanto, os resultados mostraram que, em geral, os modelos preveem retrações maiores do que aquelas obtidas experimentalmente, mesmo quando se estudam concretos com agregados reciclados (SEARA-PAZ *et al.*, 2016).

### 2.5.12 Lv *et al.* (2019)

O modelo proposto por Lv *et al.* (2019) supõe-se que o agregado reciclado de concreto é um material bifásico composto de argamassa residual e o agregado natural. Desta forma, o concreto com ACR é composto por essa argamassa residual e uma nova argamassa, sendo que a retração do concreto dependente da rigidez e quantidade do agregado graúdo. No geral o agregado natural apresenta alto módulo de elasticidade, ajudando na estabilidade dimensional dos concretos. No entanto, o uso de agregado reciclado ocasiona uma redução da rigidez do concreto, que impacta no aumento da retração dos concretos com agregado reciclado. Considerando o efeito combinado da quantidade de agregado reciclado e rigidez, a equação de predição da retração do concreto convencional (NAC) é dada por:

$$S_{NAC} = S_{TP}^{NAC} (V_{TP}^{NAC})^{\alpha} \quad (101)$$

Onde:

$S_{NAC}$ =retração do concreto convencional;

$S_{TP}^{NAC}$ =retração da argamassa;

$V_{TP}^{NAC}$ =volume total da argamassa;

$\alpha$ =coeficiente empírico, na faixa de valores de 1,2 até 1,7 e valor médio de 1,45.

Devido à natureza bifásica do ACR, o teor total de argamassa no RAC (concreto com agregado reciclado de concreto) é composto de argamassa residual e argamassa fresca. A retração do concreto com ACR é expressa pela seguinte equação:

$$S_{RAC} = S_{TP}^{RAC} (V_{TP}^{RAC})^{\alpha} \quad (102)$$

Na qual:

$S_{RAC}$ =retração do concreto com ARC;

$S_{TP}^{RAC}$ =retração da argamassa do RAC;

$V_{TP}^{RAC}$ =volume total da argamassa do RAC.

Supondo que a retração da argamassa do RAC é a mesma do concreto comum (NAC), tem-se que:

$$\frac{S_{RAC}}{S_{NAC}} = \left( \frac{V_{TP}^{RAC}}{V_{TP}^{NAC}} \right)^\alpha \quad (103)$$

Define-se um coeficiente ( $S_{MA}$ ) que contempla o aumento de retração devido a argamassa aderida, dado por:

$$S_{MA} = \left( \frac{V_{TP}^{RAC}}{V_{TP}^{NAC}} \right)^\alpha \quad (104)$$

O coeficiente  $S_{MA}$  está relacionado ao volume da argamassa total, bem como o volume de argamassa do RAC que é determinado pela seguinte expressão:

$$V_{AM} = V_{RCA} [1 - (1 - M_{AM})] \frac{\rho_{RCA}}{\rho_{OVA}} \quad (105)$$

O parâmetro  $M_{AM}$  é a relação entre a massa da argamassa aderida e a massa do ACR.  $\rho_{RCA}$  é a massa específica do agregado reciclado e  $\rho_{OVA}$  é a massa especificado do agregado natural em kg/m<sup>3</sup>. Sendo  $V_{RCA}$  o volume de agregado reciclado (m<sup>3</sup>). Como resultado, obtêm-se a expressão:

$$S_{MA} = \left( \frac{1 - V_{RCA}^{RAC} \left[ \frac{1-r}{r} x \frac{\rho_{RCA}}{\rho_{NCA}} + (1 - M_{AM}) \right]}{1 - V_{RCA}^{RAC} \left( 1 + \frac{1-r}{r} x \frac{\rho_{RCA}}{\rho_{NCA}} \right)} \right)^{1,45} \quad (106)$$

Para simplificar a expressão, aproxima-se  $\rho_{RCA} = \rho_{OVA}$ , sendo r a taxa de substituição de ARC.

Na qual a retração do concreto com agregado reciclado é dado por:

$$S_{RAC} = S_{MA} \cdot S_{NAC} \quad (107)$$

### 3 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em duas partes, uma parte experimental e outra numérica. A parte experimental contempla a caracterização do agregado graúdo reciclado e moldagem de corpos de prova de concreto com agregado graúdo reciclado para análise da retração ao longo do tempo. A parte numérica analisou modelos numéricos existentes para prever a retração através de um estudo paramétrico, análise estatística e desenvolvimento de novas propostas de modelos para previsão da retração com agregado graúdo e miúdo reciclado. As etapas estão descritas nos itens a seguir.

#### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

##### 3.1.1 Agregado Reciclado

O programa experimental visa caracterizar os agregados graúdos que são o objeto de estudo dessa pesquisa. A caracterização dos agregados é necessária para a definição do traço do concreto e análise dos seus efeitos no concreto tanto no estado fresco quanto endurecido. A Figura 20 apresenta o fluxograma contendo as etapas do programa experimental desenvolvidos para a caracterização dos agregados graúdos.

Figura 20 - Fluxograma da caracterização dos agregados graúdos.



FONTE: Autora (2022).

### 3.1.1.1 Materiais

Os agregados utilizados são o agregado miúdo (areia fina e média quartzosa natural), agregado graúdo natural (brita) e agregado graúdo reciclado.

#### a) Agregado miúdo

O agregado miúdo é a areia fina quartzosa natural (AMN1) proveniente de jazidas da cidade de Alagoinhas/BA e areia média quartzosa (AMN2) proveniente do rio Paraguaçu - Santos Estevão/BA, agregados comumente utilizados na região.

#### b) Agregado graúdo natural

O agregado graúdo usado é a brita de origem basáltica (ou granítica), com dimensão máxima característica de 19 mm, proveniente do município de Conceição do Jacuípe-Ba. O agregado foi lavado para retirada de material pulverulento ou de qualquer impureza que o mesmo pudesse conter, e posteriormente, colocado ao ar livre para secagem.

#### c) Agregado graúdo reciclado

O agregado graúdo reciclado de concreto utilizado é proveniente da empresa Águas Clara Ambiental (ACA). A unidade Águas Claras Ambiental, central de tratamento e beneficiamento de resíduos Ltda., é uma empresa pertencente a Revita Engenharia S.A, integrante do grupo Solví. O aterro de inertes gerido pela ACA conta atualmente com uma usina de beneficiamento de entulho para reciclagem do RCC recebido.

Os resíduos da construção civil (Figura 21) passam por um processo de triagem e beneficiamento, na qual o resíduo proveniente de concreto é transportado por esteiras até o britador que irá fragmentar o RCC (Figura 22 e 23), havendo o peneiramento dos materiais que são separados em diferentes granulometrias (Figura 24). São produzidos cinco tipos de agregados reciclados: bica graduada simples, areia, pedrisco (brita 0), brita 1 e brita 2.

Figura 21 – Resíduo de Construção e Demolição.



FONTE: Autora (2022).

Figura 22 – Processo beneficiamento dos resíduos.



FONTE: Autora (2022).

Figura 23 – Britador.



FONTE: Autora (2022).

Figura 24 – Separação dos agregados em diferentes granulometrias.



FONTE: Autora (2022).

Os agregados reciclados equivalentes à brita 0 (pedrisco), brita 1 e brita 2 foram recolhidos para caracterização. No entanto, para a confecção dos concretos foi utilizado o agregado reciclado de concreto equivalente à brita 1, com dimensão máxima característica de 19 mm para substituir o agregado natural.

### 3.1.1.2 Caracterização dos materiais

As características dos materiais podem influenciar nos resultados obtidos, desta forma, os mesmos devem ser submetidos à caracterização física.

#### 3.1.1.2.1 Caracterização Física

##### a) Distribuição do tamanho das partículas

As distribuições granulométricas dos agregados foram determinadas por peneiramento manual, utilizando-se os procedimentos previstos na ABNT NBR NM 248 (2003) - Agregados - Determinação da composição granulométrica, sendo, então, classificados de acordo com a ABNT NBR 7211 (2009), Agregados para concretos - Especificação). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais (Labotec 1) da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

A distribuição granulométrica é a proporção relativa das massas dos diferentes tamanhos dos grãos que constituem o material. A partir da determinação da distribuição do tamanho de partículas, também foram determinados o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados.

O módulo de finura é determinado através da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100. A dimensão máxima característica corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, que retém uma proporção igual ou imediatamente inferior a 5% da massa da amostra.

##### b) Massa específica e absorção de água

Nos agregados miúdos a massa específica e a absorção foram determinadas de acordo com as normas ABNT NBR NM 52 (2009) - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e ABNT NBR

NM 30 (2000) - Agregado miúdo – Determinação da absorção de água, respectivamente. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais (Labotec 1) da UEFS.

Os agregados graúdos tiveram sua massa específica e absorção determinadas conforme a ABNT NBR NM 53 (2009) - Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. No ensaio foram determinadas a massa específica dos agregados secos, a massa específica aparente e a massa do agregado na condição saturada com superfície seca. Além disso, calculou-se a absorção de água dos agregados graúdos.

A massa específica dos agregados secos é a relação entre a massa do agregado seco e o volume incluindo os vazios permeáveis (massa seca menos a massa submersa em água), conforme Figura 25 (A) e (B). A massa específica aparente é a relação entre massa seca e o volume do agregado excluindo-se os vazios permeáveis (massa do agregado saturado de superfície seca menos a massa submersa em água); e a massa específica o agregado na condição saturada com superfície seca (SSS) que é a relação entre a massa do agregado na condição saturada com superfície seca e o volume do agregado excluindo os vazios permeáveis.

Figura 25 – Pesagem dos Agregados Graúdos Reciclados.



(A) Massa seca.



(B) Massa submersa em água.

FONTE: Autora (2022).

c) Índice de forma

O índice de forma é a relação entre o comprimento médio e a espessura média dos grãos de agregado maiores que 9,5 mm. O índice de forma foi determinado conforme prescrições normativas da NBR 7809 (2019) - Índice de forma – Método do paquímetro, para o qual a amostra foi dividida em frações de acordo com a composição granulométrica, determinada segundo NM 248 (2003). Cada fração obtida foi quarteada até a obtenção do número de grãos necessários para a realização do ensaio.

O ensaio consistiu em medir o comprimento de cada grão em sua maior dimensão possível e a sua espessura na menor distância possível entre os planos, utilizando um paquímetro com resolução mínima de 0,1 mm. O índice de forma foi determinado pela relação do comprimento médio/espessura média do total de 200 grãos de agregado.

d) Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão *Los Angeles* mede a resistência ao desgaste superficial dos agregados graúdos quando submetido ao atrito. O valor de abrasão *Los Angeles* foi determinado conforme é estabelecido pela norma ABNT NBR NM 51 (2001) - Agregado graúdo - Ensaio de abrasão *Los Angeles*, e os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais (Labotec 1) da UEFS.

O ensaio consiste em colocar a amostra de agregado graúdo nas quantidades estabelecidas pela referida norma de acordo com a classificação do agregado, dentro do equipamento *Los Angeles* (Figura 26). A amostra é colocada juntamente com um número estabelecido de esferas de ferro totalizando a massa de carga abrasiva definida pela ABNT NBR NM 51 (2001), conforme Figura 27.

Figura 26 – Equipamento *Los Angeles*.



FONTE: Autora (2022).

Figura 27 – Esferas de ferro utilizadas no ensaio.



(A) Carga Abrasiva.



(B) Esferas juntamente com amostra.

FONTE: Autora (2022).

O número de rotações realizadas no ensaio é estabelecido de acordo com a classificação do agregado, conforme ABNT NBR NM 51 (2001). Antes da realização do ensaio, a amostra de agregado graúdo reciclado foi lavada para retirada de material pulverulento presente nos grãos e posteriormente, seca em estufa. Após a realização do ensaio, a amostra foi retirada do tambor e peneirada na peneira com abertura de 1,7 mm, o material retido na peneira foi seco até a constância de massa.

Determina-se a perda (%) por abrasão através da equação (108).

$$P = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100 \quad (108)$$

Onde:

P=perda por abrasão (%);

m= massa da amostra seca;

m<sub>1</sub>=massa retida na peneira com abertura de 1,7mm.

e) Teor de argamassa aderida – Método do choque térmico

O ensaio do teor de argamassa aderida seguiu a proposta de Amario (2019). Inicialmente, o agregado reciclado foi previamente seco em estufa, utilizou-se amostras de  $1000 \pm 10$  g que foi colocado em água a temperatura de  $3^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$  por 30 minutos. Logo em seguida, a amostra foi colocada diretamente no forno mufla da Quimis (Figura 28) à temperatura de  $600^{\circ} \text{C}$  na qual permaneceu por 2 horas.

Posteriormente, a amostra foi retirada do forno e colocada em água a temperatura de  $3^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$  por 30 minutos (Figura 29). Em seguida os grãos do agregado foram friccionados utilizando um pano, para a retirada da argamassa aderida fragilizada pelo choque térmico (Figura 30), e lavados na peneira com abertura de 1,7 mm para remoção de toda a argamassa solta. A amostra retida na peneira foi seca novamente para determinação do teor de argamassa aderida.

Figura 28 – Amostra de agregado no forno.



(A) Forno Mufla.



(B) Amostra do agregado reciclado.

FONTE: Autora (2022).

Figura 29 – Amostra imersa em água.



Figura 30 – Retirada da argamassa.



FONTE: Autora (2022).

O teor de argamassa aderida é determinado pela expressão dada pela equação 109:

$$AA = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (109)$$

Onde:

AA=teor de argamassa aderida (%);

$m_i$ = massa inicial da amostra seca;

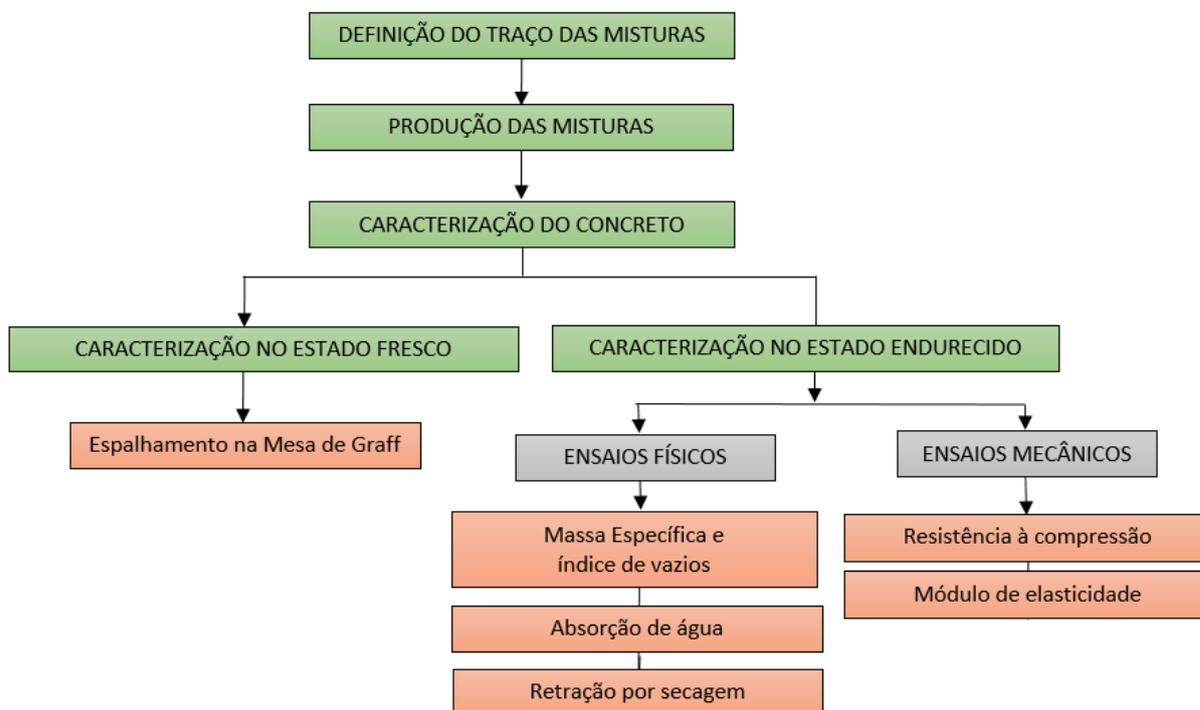
$m_f$ =massa final da amostra seca retida na peneira com abertura de 1,7mm.

### 3.1.2 Concreto com Agregado Reciclado

O programa experimental desta seção tem o objetivo de analisar as propriedades do concreto com agregado reciclado e de referência com agregado natural. A Figura 31 apresenta os fluxogramas contendo as etapas do programa experimental desenvolvidos para a caracterização do concreto.

Após a caracterização dos materiais, definiu-se os traços do concreto. Então, realizou-se misturas experimentais que foram caracterizadas no estado fresco, com posterior preparação dos corpos de prova na qual foram realizadas a caracterização no estado endurecido, através de ensaios físicos e mecânicos conforme fluxograma exposto na Figura 31.

Figura 31 - Fluxograma da caracterização do concreto.



FONTE: Autora (2022).

### 3.1.2.1 Materiais

Os materiais que foram utilizados na produção das misturas são cimento Portland (CP II-Z 32), agregado miúdo (areia fina e média quartzosa natural), agregado graúdo natural (brita 1), agregado graúdo reciclado (brita 1), aditivo superplastificante, água potável e em algumas misturas adição (cinza volante). Os materiais utilizados serão descritos nos itens seguintes, com exceção dos agregados que já foram apresentados na seção 3.1.1.1.

#### a) Cimento Portland

O cimento usado para a confecção dos corpos de prova é o CPII- Z 32, cimento Portland composto com pozolana. Este tipo de cimento foi escolhido em virtude de sua disponibilidade na região.

#### b) Água

A água utilizada é proveniente da rede de abastecimento da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

### c) Adições

A cinza volante foi o material utilizado como substituto parcial do cimento Portland em algumas misturas. Segundo a NBR 12653: 2014 (Materiais Pozolânicos – Requisitos), as cinzas volantes são materiais finamente divididos que são resultantes da combustão do carvão mineral. Na pesquisa foram utilizados 15% e 30% de cinza volante em substituição ao cimento Portland, em massa.

### d) Aditivos

Na produção das misturas de concreto foi necessária a utilização de aditivo superplastificante, com o intuito de reduzir a demanda de água e contribuir com a trabalhabilidade. O aditivo utilizado foi o Adiment da marca Vedacit, composto basicamente por resina melamina-formaldeído. O teor de aditivo recomendado pelo fabricante varia entre 0,5 a 1,5%, sobre a massa de aglomerante.

## 3.1.2.2 Caracterização dos materiais

As características dos materiais podem influenciar nos resultados obtidos, desta forma, os mesmos devem ser submetidos à caracterização física. Na seção 3.1.1.2 foram apresentados a caracterização dos agregados. Nesta seção serão apresentadas a caracterização dos demais materiais.

### 3.1.2.2.1 Caracterização Física

#### a) Distribuição do tamanho das partículas

As partículas de cinza volante tiveram sua granulometria determinadas utilizando a sedigrafia à laser, técnica que se baseia na captação da fração de luz que atravessa a amostra que está em suspensão, na qual é registrada a porcentagem de massa acumulada em função do diâmetro equivalente das partículas. O ensaio de sedigrafia à laser foi realizado utilizando um granulômetro a laser Malvern, do modelo Mastersizer 3000E Basic, da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

### b) Massa específica e absorção de água

A massa específica da cinza volante foi determinada de acordo com a NBR NM 23:2000 (Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica).

#### 3.1.2.3 Definição dos traços das misturas

O traço inicial foi definido de acordo com o trabalho desenvolvido por Santos (2016), ajustado nas proporções das misturas experimentais do concreto com agregado reciclado, na qual o traço referência com agregado natural é designado por REF. No intuito de avaliar o efeito do agregado reciclado nas propriedades do concreto foram confeccionados concretos com relação água/cimento (a/c) igual 0,55 e 0,65. Nas misturas com relação a/c=0,65 utilizou-se um teor de 40% de ACR em substituição ao natural, confeccionando-se também misturas com cinza volante no teor de 15% e 30%. Nas misturas com relação a/c=0,55, utilizou 20% e 40% de ACR, além de uma mistura que foi confeccionada com 40% de agregado reciclado após a retirada da argamassa aderida.

A Tabela 27 apresenta um resumo da nomenclatura utilizada para cada uma das misturas.

Tabela 27 - Misturas e nomenclatura utilizada.

MISTURAS	NOMENCLATURA
Concreto referência com a/c=0,65	REF65
Concreto referência com a/c=0,55	REF55
Concreto 40% de RCD com a/c=0,65	40RCD65
Concreto 40% de RCD com 15% cinza volante e a/c=0,65	40RCD15CV65
Concreto 40% de RCD com 30% cinza volante e a/c=0,65	40RCD30CV65
Concreto 20% de RCD com a/c=0,55	20RCD55
Concreto 40% de RCD com a/c=0,55	40RCD55
Concreto 40% de RCD com a/c=0,55 e sem argamassa aderida	40RCD55SA

FONTE: Autora (2022).

O traço final e o consumo de materiais utilizados para a produção das misturas estão expostos na Tabela 28 e 29, respectivamente. Definiu-se misturas utilizando a relação água/aglomerante de 0,65 no intuito de potencializar a retração por secagem e verificar o efeito da cinza volante na mesma. No entanto,

outras misturas com relação água/aglomerante de 0,55 foram produzidas para verificar a variação do teor de substituição do agregado reciclado (20% e 40%), bem como o efeito da argamassa aderida.

Tabela 28 – Traço utilizado na confecção das misturas.

Traço em massa							
Misturas	Cimento	Cinza Volante	Areia Fina	Areia Grossa	Brita	Reciclado	a/agl
REF65	1	0	2,29	0,76	3,45	0	0,65
REF55	1	0	1,68	0,56	3,45	0	0,55
40RCD65	1	0	2,29	0,76	2,07	1,38	0,65
40RCD15CV65	0,85	0,15	2,29	0,76	2,07	1,38	0,65
40RCD30CV65	0,70	0,30	2,29	0,76	2,07	1,38	0,65
20RCD55	1	0	1,68	0,56	2,76	0,69	0,55
40RCD55	1	0	1,68	0,56	2,07	1,38	0,55
40RCD55SA	1	0	1,68	0,56	2,07	1,38	0,55

FONTE: Autora (2022).

Tabela 29 - Consumo das misturas para 1 m<sup>3</sup> de concreto.

Consumo (kg/m <sup>3</sup> )							
Misturas	cimento	cinza volante	areia fina	areia grossa	brita	ACR	água
REF65	314	0	719	239	1083	0	204
REF55	383	0	643	214	1320	0	210
40RCD65	294	0	674	224	609	406	191
40RCD15CV65	249	44	670	222	606	404	190
40RCD30CV65	204	87	667	221	602	402	189
20RCD55	382	0	641	214	1054	263	210
40RCD55	356	0	599	200	738	492	196
40RCD55SA	356	0	599	200	738	492	196

FONTE: Autora (2022).

#### 3.1.2.4 Produção das misturas e moldagem dos corpos de prova

As moldagens dos corpos de prova foram efetuadas de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015) - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, para a realização dos ensaios físico-mecânicos. A Tabela 30 apresenta, de acordo com o ensaio, o quantitativo de corpos de prova, bem como as dimensões em cm para os ensaios físicos-mecânicos.

Tabela 30 - Dimensões e quantidades dos corpos de prova.

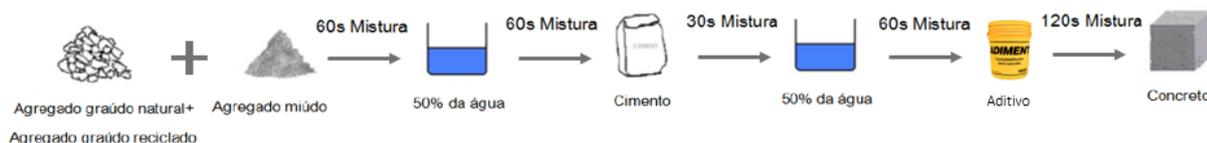
Ensaio	Forma	Dimensões (cm)	Quantidade por ensaio
Compressão aos 28 dias	cilíndrico	10x20	3
Módulo de Elasticidade	cilíndrico	10x20	3
Absorção por Imersão	cilíndrico	10x20	3
Capilaridade	cilíndrico	10x20	3
Retração	prismático	7,5X7,5X28,5	3

FONTE: Autora (2022).

Os concretos foram confeccionados utilizando-se uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 145 litros do Laboratório de Dosagem da UEFS. A produção dos concretos, a sequência e o tempo de mistura foram realizados conforme estabelecido no método de misturas em duas etapas (TSMA) descrito por Tam *et al.* (2005).

No entanto, nas misturas com agregado reciclado foi necessário utilizar aditivo superplastificante, neste caso, o método de mistura foi adaptado conforme Figura 32, sendo o aditivo acrescentado a mistura após adicionada o restante de água, sendo então misturada por mais 120 s.

Figura 32 – Método de mistura com aditivo superplastificante.



FONTE: Adaptado de Tam *et al.* (2005).

### 3.1.2.5 Caracterização do concreto

#### 3.1.2.5.1 Caracterização no Estado Fresco

A consistência do concreto foi avaliada com base na ABNT NBR NM 68 (1998) - Concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. De acordo com Leite *et al.* (2013), o *flow teste* (Teste de Graff) é mais adequado para determinar a consistência do concreto com agregado reciclado que o *slump test* e o *VeBe test*.

Figura 33 – Ensaio de espalhamento na mesa de Graff.



(A) Mistura após a retirada do molde. (B) Medidas do espalhamento.

Fonte: Autora (2022).

Após realizada a mistura do concreto, antes da moldagem dos corpos de prova, realizou-se o ensaio de espalhamento na mesa de Graff, seguindo a norma ABNT NBR NM 68 (1998), conforme Figura 33 (A) e (B). O espalhamento foi determinado, em milímetros, com auxílio de uma régua posicionada paralelamente aos lados da mesa, e medidos os valores de espalhamento na direção dos maiores diâmetros, como exposto na Figura 33 (B).

#### 3.1.2.5.2 Caracterização no Estado Endurecido

##### a) Ensaio Físicos

##### i. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por ascensão capilar foi obtida conforme as prescrições da ABNT NBR 9779 (2012) - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.

Os corpos de prova após a cura foram secos em estufa, obtendo-se a massa seca ( $m_s$ ) e o valor da massa saturada ( $m_{sat}$ ) foi obtido após um período de exposição em contato com a água. As massas saturadas foram aferidas nos seguintes intervalos, conforme Tabela 31:

Tabela 31 – Misturas e tempo de leitura da massa saturada ( $m_{sat}$ ).

Misturas	Leituras (h)								
	a/c=0,65	3	6	24	48	72	96	120	144
a/c=0,55	3	6	24	48	72	96	120	144	192
	216	240	288	336	382	502	550	670	

Fonte: Autora (2022).

A absorção por capilaridade  $C$  (g/cm<sup>2</sup>) é determinada pela equação 110, onde  $A$  representa a área da seção transversal do corpo de prova em cm<sup>2</sup>.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{A} \quad (110)$$

A Figura 34 ilustra o ensaio de absorção por capilaridade, o mesmo foi realizado até a saturação dos corpos de prova. No ensaio de absorção por capilaridade, as amostras com relação a/c=0,55 foram seladas em sua lateral para garantir o fluxo unidirecional e evitar a perda de umidade.

Figura 34 – Ensaio de absorção por capilaridade.



FONTE: Autora (2022).

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

O ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica foram realizados conforme procedimento descrito na ABNT NBR 9778 (2005) - Argamassa e concreto – Determinação da absorção de água, índice de vazios e

massa específica. Na qual se obtêm o valor da absorção de água (%) conforme a equação 111.

$$A = \frac{m_{sat}-m_s}{m_s} \times 100 \quad (111)$$

Onde:

$m_{sat}$  = massa saturada após imersão e fervura (g);

$m_s$  = massa seca (g).

O índice de vazios (I) é determinado conforme equação 112, dado em %, e a massa específica ( $\rho_s$ ) pela expressão dada na equação 113.

$$I = \frac{m_{sat}-m_s}{m_{sat}-m_i} \times 100 \quad (112)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat}-m_i} \quad (113)$$

Onde:

$m_{sat}$  = massa saturada após imersão e fervura (g);

$m_s$  = massa seca (g);

$m_i$  = massa saturada imersa (g).

## b) Ensaios Mecânicos

### i. Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018) - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. O limite de resistência à compressão é determinado através da relação entre a carga máxima suportada pelo corpo de prova e a área da seção transversal. Antes do início da realização do ensaio todos os corpos de prova foram faceados no topo com o objetivo de obter superfícies planas e permitir a distribuição de cargas de maneira uniforme.

Figura 35 – Ensaio de resistência à compressão.



FONTE: Autora (2022).

A Figura 35 ilustra o ensaio de resistência à compressão realizado nos corpos de prova utilizando uma máquina universal de ensaios com capacidade para 100 tf e resolução de 10 kgf, da EMIC, disponível no Laboratório de Materiais de Construção da UEFS.

## ii. Módulo de Elasticidade

Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados conforme a NBR 8522 (2017) - Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão, na qual utilizou-se a metodologia A com tensão  $\sigma_a$  fixa. O ensaio foi realizado utilizando compressômetro com bases independentes, com dois relógios comparadores, com resolução de 0,001mm, que são fixados no anel em pontos equidistantes e apoiados para as medidas das deformações. Os anéis são fixados em três pontos equidistantes na superfície dos corpos de prova, não permitindo a sua rotação durante a aplicação da carga.

A leitura de cada relógio comparador é obtida de forma simultânea, individualizada e independente. O deslocamento do corpo de prova é a média das leituras das bases medidas obtidas nos relógios comparadores.

Figura 36 – Ensaio de módulo de elasticidade.



FONTE: Autora (2022).

A Figura 36 representa a aplicação da carga com a medida de deslocamento do relógio comparador. Posteriormente, são realizados os cálculos do módulo de elasticidade utilizando o deslocamento médio para a determinação da deformação. Os ensaios foram realizados na prensa Shimadzu Autograph AG IC-100 kN, disponível no Laboratório de Materiais Compósitos da UEFS.

### 3.1.3 Retração do Concreto

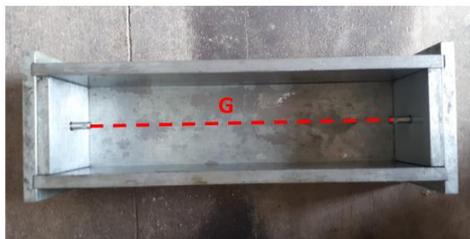
Na pesquisa analisou-se a retração por secagem, a metodologia adotada nos ensaios está disposta a seguir.

O ensaio de retração por secagem foi realizado conforme estabelece a norma ASTM C157/C157M-17 (*Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*). Os corpos de prova apresentam um formato prismático de dimensões 75 mm x 75 mm, seção transversal quadrada e 285 mm de comprimento.

Antes da moldagem, as formas foram revestidas com óleo desmoldante, e posteriormente, colocados os pinos de medida em suas extremidades. Deve-se manter os pinos sem óleo, pois pode afetar a aderência do mesmo ao concreto. De acordo com a ASTM C490/C490M – 17 (*Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*) a distância livre entre os pinos deve ser de  $250 \pm 2,5$  mm.

Sendo assim, após a colocação dos pinos nas extremidades dos moldes, verificou-se a distância entre eles obtendo-se o comprimento denominado G, como exposto na Figura 37.

Figura 37 - Colocação dos pinos e obtenção da distância G.



FONTE: Autora (2022).

A moldagem foi realizada em duas camadas, sendo cada camada adensada. Utilizou-se uma régua metálica para nivelar a superfície dos corpos de prova. Os corpos de prova após a moldagem foram protegidos por meio de plástico para não perder umidade para o ambiente durante o período de 24 h.

Os corpos de prova foram desmoldados após 24h e mantidos durante 28 dias em cura. Posteriormente, os espécimes foram levados para uma sala climatizada, com temperatura ( $T=23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) e umidade ( $UR=50 \pm 2\%$ ) controlados, e então, procedeu-se a primeira leitura do processo de retração por secagem (Figura 38).

Figura 38 - Corpo de prova desmoldado e realização da 1ª leitura.



FONTE: Autora (2022).

Após as primeiras leituras, os espécimes foram mantidos na sala climatizada, dispostos de forma que houvesse circulação de ar em torno de suas faces, conforme exposto na Figura 39.

Figura 39 - Disposição dos corpos de prova na sala climatizada.



FONTE: Autora (2022).

Os procedimentos de leitura do comprimento dos corpos de prova seguem as prescrições da ASTM C490/C490M – 17 (*Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*). As medidas foram realizadas manualmente, verificando o comprimento dos prismas de concreto com o auxílio de um aparato constituído por uma base metálica, acoplado um relógio comparador digital com precisão de 0,001mm na parte superior, conforme Figura 40.

Figura 40 – Medição do comprimento dos corpos de prova.



FONTE: Autora (2022).

Antes da realização das medidas é feita a calibração do relógio comparador utilizando uma barra de referência de 250 mm de comprimento (Figura 41). Posteriormente, realiza-se a medição dos corpos de prova, que são encaixados verticalmente na base metálica, devendo o mesmo sempre ser posicionado no mesmo sentido, sendo necessário indicar por meio de seta o posicionamento das leituras (Figura 40). Em seguida o corpo de prova é girado em torno do seu eixo e registrada a menor medida indicada pelo relógio comparador. Este giro é necessário para diminuir o erro devido a excentricidade do espécime (TAKA-OCA, 2010).

Figura 41 - Calibração do relógio de referência.



FONTE: Autora (2022).

Após a medição do comprimento dos espécimes é realizada as medidas em massa dos corpos de prova com auxílio de uma balança, com precisão 0,01

g (Figura 42). Durante o período de 7 dias foram realizadas leituras diárias, posteriormente, as leituras foram realizadas semanalmente, ou seja, a cada 7 dias, durante 30 dias. As demais leituras foram realizadas mensalmente.

Figura 42 - Pesagem do corpo de prova.



FONTE: Autora (2022).

O cálculo das deformações por retração é determinado pela mudança de comprimento dos corpos de prova, obtidos através da equação 114 dada a seguir:

$$\Delta L_t = \frac{L_{s,t} - L_{s,i}}{G} \times 100 \quad (114)$$

Onde:

$\Delta L_t$  = variação de comprimento no tempo t;

$L_{s,t}$  = comprimento da amostra em um determinado tempo (mm);

$L_{s,i}$  = comprimento inicial da amostra (mm);

G = distância interna entre os pinos (aproximadamente 250 mm).

A perda de massa é determinada pela relação entre as diferenças de massas e a massa inicial, conforme exposto na Equação 115.

$$W = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (115)$$

Na qual:

W = perda de massa;

$m_i$  = massa inicial da amostra após 28 dias de cura em água (g);

$m_t$  = massa da amostra em um determinado tempo (g).

Cabe ressaltar que neste ensaio, conforme prescrito pela ASTM C157/C157M-17, o início da secagem se inicia após 28 dias, sendo assim, a retração obtida engloba tanto a retração por secagem quanto a autógena. No entanto, a contribuição da retração autógena é considerada desprezível para os concretos de resistência normal.

### **3.2 PROCEDIMENTO NUMÉRICO**

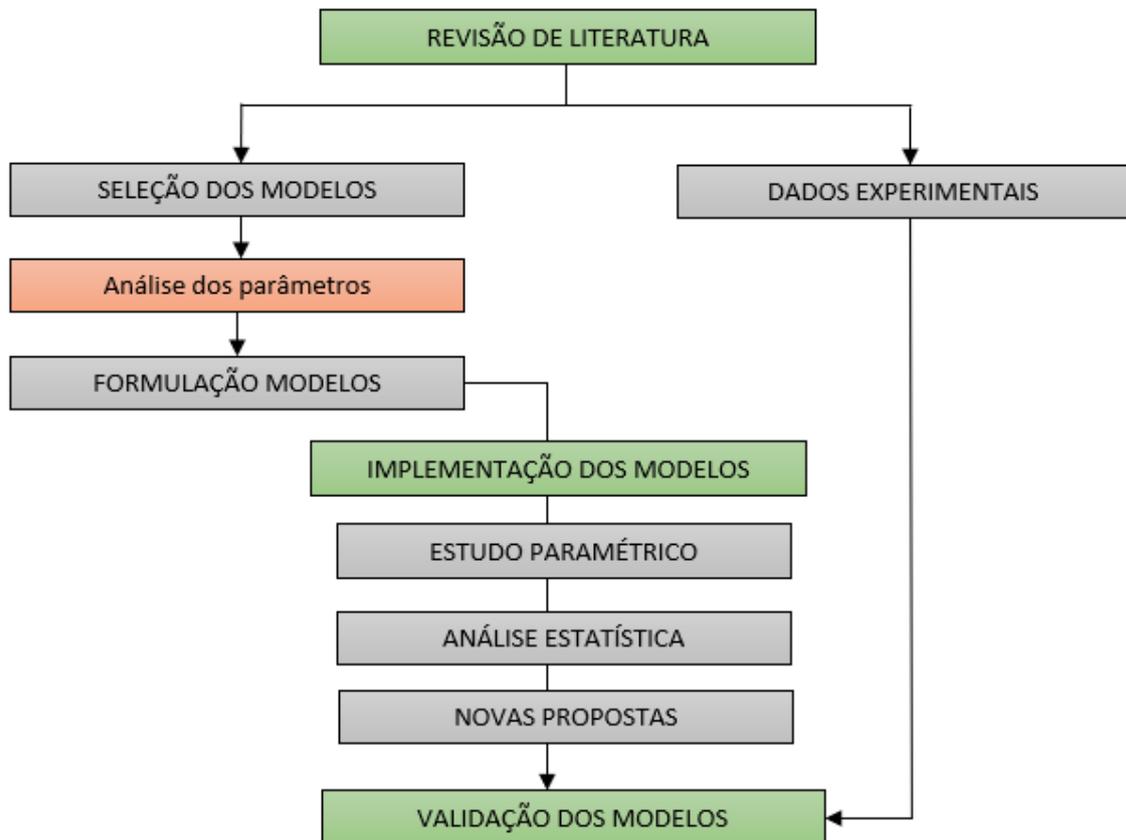
A elaboração do trabalho proposto envolveu a realização de uma extensa revisão bibliográfica sobre estudos teóricos e experimentais relacionados a retração. Na qual foram selecionados modelos de previsão da retração e analisado se os mesmos eram capazes de representar a retração dos concretos com agregado reciclado. A análise baseou-se em um estudo paramétrico e estatístico, posteriormente, novas formulações foram propostas para previsão da retração do concreto com agregado reciclado e validada com dados experimentais.

Inicialmente, os modelos selecionados foram analisados, verificado os parâmetros existentes nas formulações e a aplicabilidade dos modelos matemáticos já usados para prever a retração do concreto convencional, em concretos com agregado reciclado.

Os modelos foram formulados através de um procedimento incremental iterativo e implementado em um código que utiliza o programa MATLAB, gerando curvas de deformação ao longo do tempo. Os resultados obtidos pelo procedimento numérico foram comparados com outros oriundos de diferentes propostas disponíveis na literatura e, posteriormente, foram validados através de comparações com dados experimentais obtidos e também publicados por autores diversos.

As etapas desenvolvidas no procedimento numérico estão expostas na Figura 43.

Figura 43 - Fluxograma para procedimento numérico.



FONTE: Autora (2022).

### 3.2.1 Implementação dos modelos

Os dez modelos analisados foram implementados utilizando-se o programa MatLab R2016a. O programa é considerado de fácil manipulação, na qual os dados são armazenados em matrizes, possuindo uma linguagem de programação de alto nível (MATHWORKS, 2009). O modelo proposto por Lv *et al.* (2019) não foi analisado por conter em sua formulação o teor de argamassa aderida, parâmetro considerado não adequado para previsão da retração devido.

### 3.2.2 Estudo paramétrico

#### 3.2.2.1 Análise paramétrica isolada

As formulações matemáticas para previsão da retração englobam diversos parâmetros, nas quais é importante verificar a sensibilidade destes modelos em relação aos parâmetros individuais com o intuito de avaliar as variáveis que

possuem maior influenciaram em cada modelo. Desta forma, é possível manipular os parâmetros responsáveis por gerar maiores alterações nas curvas teóricas.

Alguns parâmetros apesar de ser intrínsecos a mistura (quantidade de cimento, água e agregado) foram isolados para verificar o efeito destes nos valores obtidos na retração. Apesar de alguns autores, como Lark e Barr (2005) e Takaoka (2010) afirmarem que é muito difícil isolar apenas um parâmetro nos modelos, a partir do estudo das formulações dos modelos foi possível isolá-los e fixá-los, de forma hipotética, para variar outros parâmetros e assim verificar a sensibilidade dos modelos de previsão aos parâmetros de entrada.

A análise paramétrica isolada foi realizada de duas formas, individualmente para cada modelo variando um dos parâmetros e mantendo os outros constantes e também realizou-se uma análise comparativa entre os modelos. A análise comparativa foi feita naqueles modelos que possuem parâmetros comuns entre si, verificando entre os modelos aqueles parâmetros que possuem maior influência. Inicialmente verificou-se os parâmetros de entrada de cada um dos modelos separando em categorias:

- Parâmetros de projeto (umidade relativa, resistência à compressão e módulo de elasticidade);
- Parâmetros de mistura (relação água/cimento, relação agregado total/cimento, relação agregado miúdo/cimento, relação agregado graúdo/agregado miúdo, relação agregado miúdo/agregado total, teor de água e teor de cimento);
- Parâmetros dos materiais (tipo de cimento, tipo de agregado, aditivos e adições);
- Parâmetros geométricos (relação volume/superfície, forma e espessura fictícia);
- Parâmetros de cura (tipo de cura e período de cura);
- Parâmetros do concreto (massa específica do concreto, abatimento e teor de ar).

Posteriormente, analisou-se entre os modelos aqueles que apresentavam parâmetros comuns conforme Tabela 32.

Tabela 32 – Parâmetros de entrada dos modelos para a previsão da retração.

<b>Categoria</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>NBR 6118 (2014)</b>	<b>EUROCODE 2 (2008)</b>	<b>MODELO II (1978)</b>	<b>MODELO B3 (1995)</b>	<b>MODELO B4 (2015)</b>	<b>CEB-FIP (1990)</b>	<b>CEB-FIB (2010)</b>	<b>GARDNER (2004)</b>	<b>ACI (1978)</b>	<b>ACI (1992)</b>
Projeto	Umidade Relativa (%)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	----	X	X	X	X	X	X	X	----	----
	Módulo de Elasticidade (MPa)	----	----	----	X	X	----	----	----	----	----
Mistura	Relação água/cimento	----	----	X	----	X	----	----	----	----	----
	Relação agregado total/cimento	----	----	X	----	X	----	----	----	----	----
	Relação agregado miúdo/cimento	----	----	X	----	----	----	----	----	----	----
	Relação agregado graúdo/agregado do miúdo	----	----	X	----	----	----	----	----	----	----
	Relação agregado miúdo/agregado total	----	----	----	----	----	----	----	----	X	X
	Teor de água	----	----	----	X	----	----	----	----	----	----
	Teor de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	----	----	----	----	X	----	----	----	X	X

<b>Categoria</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>NBR 6118 (2014)</b>	<b>EUROCODE 2 (2008)</b>	<b>MODELO II (1978)</b>	<b>MODELO B3 (1995)</b>	<b>MODELO B4 (2015)</b>	<b>CEB-FIP (1990)</b>	<b>CEB-FIB (2010)</b>	<b>GARDNER (2004)</b>	<b>ACI (1978)</b>	<b>ACI (1992)</b>
Materiais	Tipo de cimento	----	X	----	X	X	X	X'	X	X	----
	Tipo de Agregado	----	----	----	----	X	----	----	----	----	----
	Aditivos e Adições	----	----	----	----	X	----	----	----	----	----
Geométricos	Relação volume/superfície (mm)	----	----	X	----	X	----	----	----	X	----
	Forma	----	----	X	X	X	----	----	----	----	----
	Espessura fictícia	X	X	----	----	----	X	X	----	----	----
Cura	Tipo de cura	----	----	----	X	----	----	----	----	X	X
	Período de cura (dia)	----	----	----	----	----	----	----	----	X	X
Concreto	Massa Específica do concreto	----	----	----	----	X	----	----	----	----	----
	Abatimento (slump)	X	----	----	----	----	----	----	----	X	X
	Teor de ar (%)	----	----	----	----	----	----	----	----	X	X

FONTE: Autora (2022).

Na análise comparativa da sensibilidade dos modelos aos parâmetros comuns, definiu-se um traço padrão para concretos com resistência à compressão de 30MPa e 60MPa conforme Tabela 33, obtido de Andrade (2018).

Tabela 33 – Traço padrão para análise paramétrica.

<b>Materiais</b>	<b>Traço – 30MPa</b>	<b>Traço – 60 MPa</b>
Brita 0 (g)	846,9 g/m <sup>3</sup>	782 g/m <sup>3</sup>
Areia (m)	887,1 g/m <sup>3</sup>	819,2 g/m <sup>3</sup>
Cimento (cim)	312,3 g/m <sup>3</sup>	525 g/m <sup>3</sup>
Água (a)	223,4 g/m <sup>3</sup>	207,1 g/m <sup>3</sup>
Areia/Agregado (m/t)	0,51	0,51
Brita/Areia (g/m)	0,95	0,95
Areia/Cimento (m/c)	2,84	1,56
Agregado total/cimento (t/c)	5,55	3,04
Água/cimento (a/c)	0,60	0,35

FONTE: Adaptado de Andrade (2018).

Inicialmente variou-se a umidade relativa, pois é o único parâmetro comum a todos modelos. Posteriormente, fixou-se a umidade relativa (UR=60%) e foi variando os demais parâmetros conforme fluxograma apresentado na Figura 44.

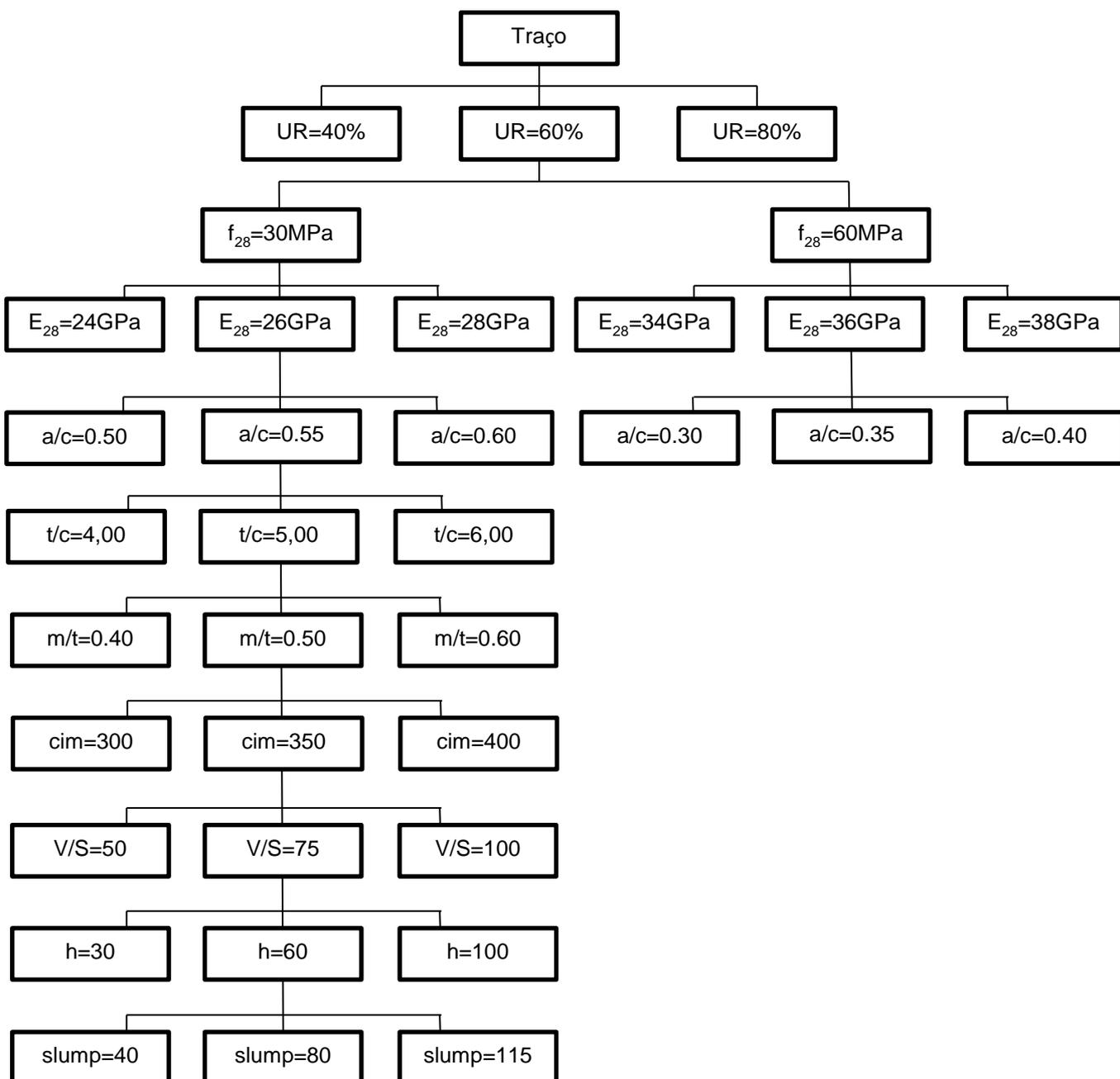
A variação dos parâmetros de entrada foi determinada de modo a representar condições de laboratório, bem como ambiente reais, além de considerar os valores usuais dos parâmetros analisados. Em ambiente de laboratório para obtenção dos valores experimentais utilizados para calibração dos modelos, a umidade relativa do ar é controlada. No entanto, no ambiente real na qual as estruturas de concreto estarão expostas, a umidade relativa do ar varia, devendo essa variação ser considerada para verificação de sua influência no valor da retração.

Na resistência à compressão foram consideradas duas classes de resistência, 30 MPa e 60 MPa. É importante destacar que os parâmetros de mistura, como a relação água/cimento, afetam a resistência. Desta forma, apenas nos modelos que não havia os parâmetros de mistura foram analisadas de forma isolada a variação da resistência à compressão. Posteriormente, nos modelos que apresentavam os parâmetros de mistura, fixou-se a resistência e módulo de elasticidade e variou-se de forma teórica a relação água/cimento.

O módulo de elasticidade é uma variável dependente da resistência, no entanto, fixou-se também de forma teórica a resistência e analisou-se para aquela determinada resistência variações possíveis do módulo de elasticidade.

Na análise dos outros parâmetros, fixou-se a resistência de 30 MPa por ser mais usual e variou-se os demais parâmetros conforme exposto na Figura 44. No fluxograma, as variações propostas para os parâmetros são dispostas na horizontal, enquanto as variáveis que se mantem fixas são dispostas na vertical.

Figura 44- Fluxograma com os parâmetros fixos e variáveis.



FONTE: Autora (2022).

A Tabela 34 apresenta os valores utilizados para cada um dos parâmetros dos modelos. Alguns valores não são expostos na Tabela 3 pois são valores pré-estabelecidos em tabelas específicas de cada modelo.

Tabela 34 – Parâmetros com os valores de entrada adotados para cada modelo.

Parâmetros	NBR 6118 (2014)	EURO- CODE 2 (2008)	MODELO II (1978)	MODELO B3 (1995)	MODELO B4 (2015)	CEB-FIP (1990)	CEB-FIB (2010)	GARDNER (2004)	ACI (1978)	ACI (1992)
Umidade Relativa (%)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	----	30	30	30	30	30	30	30	----	----
	----	60	60	60	60	60	60	60	----	----
Módulo de Elasti- cidade (MPa)	----	----	----	24	24	----	----	----	----	----
	----	----	----	25	25	----	----	----	----	----
	----	----	----	26	26	----	----	----	----	----
	----	----	----	34	34	----	----	----	----	----
	----	----	----	35	35	----	----	----	----	----
Relação água/ cimento	----	----	0,30	----	0,30	----	----	----	----	----
	----	----	0,35	----	0,35	----	----	----	----	----
	----	----	0,40	----	0,40	----	----	----	----	----
	----	----	0,50	----	0,50	----	----	----	----	----
	----	----	0,55	----	0,55	----	----	----	----	----
Relação agregado total/cimento	----	----	0,60	----	0,60	----	----	----	----	----
	----	----	4,00	----	4,00	----	----	----	----	----
	----	----	5,00	----	5,00	----	----	----	----	----
Relação agregado miúdo/cimento	----	----	6,00	----	6,00	----	----	----	----	----
	----	----	1,55	----	----	----	----	----	----	----
	----	----	1,60	----	----	----	----	----	----	----
			2,70							
			2,85							

Parâmetros	NBR 6118 (2014)	EURO-CODE 2 (2008)	MODELO II (1978)	MODELO B3 (1995)	MODELO B4 (2015)	CEB-FIP (1990)	CEB-FIB (2010)	GARDNER (2004)	ACI (1978)	ACI (1992)
Relação agregado graúdo/agregado miúdo	----	----	0.5 1 1.5 2	----	----	----	----	----	----	----
Relação agregado miúdo/agregado total	----	----	----	----	----	----	----	----	0,40 0,50 0,60	0,40 0,50 0,60
Teor de água	----	----	----	200 220 235	----	----	----	----	----	----
Teor de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	----	----	----	----	300 350 400	----	----	----	300 350 400	300 350 400
Tipo de cimento	----	Classe S Classe N Classe R	----	Tipo I Tipo II Tipo III	Endurecimento rápido Endurecimento lento Endurecimento regular	Endurecimento Lento Normal ou Rápido Alta resistência	CEM I CEM II CEM III	Tipo I Tipo II Tipo III	CEM I CEM III	----
Tipo de Agregado	----	----	----	----	Diábase Quartzito Cálcario Arenito Granito Quartzo diorito	----	----	----	----	----

Parâmetros	NBR 6118 (2014)	EURO-CODE 2 (2008)	MODELO II (1978)	MODELO B3 (1995)	MODELO B4 (2015)	CEB-FIP (1990)	CEB-FIB (2010)	GARDNER (2004)	ACI (1978)	ACI (1992)
Aditivos e Adições	----	----	----	----	Aditivo retardador Cinza volante Aditivo superplastificante/ plastificante Sílica ativa Aditivo incorporador de ar Aditivo redutor de água	----	----	----	----	----
Relação volume/superfície (mm)	----	----	50 75 100	----	50 75 100	----	----	----	50 75 100	----
Forma	----	----	laje cilindro prisma esfera cubo	laje cilindro prisma esfera cubo	laje cilindro prisma esfera cubo	----	----	----	----	----
Espessura fictícia (cm)	30 60 100	30 60 100	----	----	30 60 100	30 60 100	30 60 100	----	----	----
Tipo de cura	----	----	----	Úmida Térmica	-----	----	----	----	Úmida Térmica	Úmida Térmica

Parâmetros	NBR 6118 (2014)	EURO-CODE 2 (2008)	MODELO II (1978)	MODELO B3 (1995)	MODELO B4 (2015)	CEB-FIP (1990)	CEB-FIB (2010)	GARDNER (2004)	ACI (1978)	ACI (1992)
Período de cura (dias)	----	----	----	----	----	----	----	----	1 3 7 14 28 90	1 3 7 14 28 90
Massa Específica do concreto (kg/m <sup>3</sup> )	----	----	----	----	2200 2270 2300 2350	----	----	----	----	----
Abatimento (mm)	40 80 115	----	----	----	----	----	----	----	40 80 115	40 80 115
Teor de ar (%)	----	----	----	----	----	----	----	----	Depen- dentes da cura/ cimento	Adotado mesmo ACI 1978

FONTE: Autora (2022).

Os resultados de retração utilizados para as análises foram obtidos aos 90 dias. Verificou-se na análise comparativa entre os modelos a variação percentual (%) de cada um dos parâmetros de acordo com um valor de referência, conforme expressão dada a seguir:

$$\text{Variação \%} = \left( \frac{V_F}{V_I} - 1 \right) \times 100 \quad (116)$$

Onde:

$V_F$ =valor final;

$V_I$ =valor inicial (referência).

Na análise dos modelos de forma isolada, variou-se um dos parâmetros e manteve-se constante os outros verificando a variação percentual (%) dos valores extremos obtidos na retração. Essa análise foi efetuada de forma isolada para cada um dos modelos verificando o parâmetro de maior influência na retração por secagem. Nos resultados considera-se mudanças significativas aquelas variações superiores a 20%.

### **3.2.3 Análise estatística**

Os estudos experimentais com modelos de previsão da retração não permitem concluir qual o modelo mais apropriado, devido aos diversos parâmetros utilizados para diferentes valores, o que torna difícil a decisão de qual modelo é o mais adequado, considerando as variáveis que cada um adota. Desta forma, para comparação dos modelos de previsão da retração manteve-se uma equivalência nos parâmetros e condições utilizadas.

A análise estatística utilizou indicadores que apontem os modelos mais apropriados para prever a retração dentro das condições estabelecidas. O estudo foi realizado com dados experimentais do concreto com agregado miúdo reciclado obtidos da literatura (ANDRADE, 2018) e nos concretos com agregado graúdo reciclado utilizou-se os dados dos ensaios realizados.

Nos concretos com agregado miúdo reciclado, avaliou-se misturas com resistências à compressão de 30 e 60 MPa, na qual utilizou-se três teores de substituição (0%, 25% e 50%). A Tabela 35 apresenta a composição das misturas e a Tabela 36 os resultados da caracterização do concreto. Na Tabela 35 também é apresentada a relação entre o teor total de agregado miúdo (FA) e o teor total de agregado (TA), valores utilizados na modelagem teórica da retração, juntamente com a relação entre teor de agregado total (TA) e teor de cimento.

Tabela 35 - Composição das misturas de concreto com agregado miúdo reciclado.

Misturas	Composição (kg/m <sup>3</sup> )					FA/TA (%)	TA/cimento,g
	Cimento	CA	NFA	RFA	Água		
C30	329,3	843,5	906,8	0,0	219,1	51,80	5,32
C30-25	324,5	842,1	696,4	197,3	223,3	51,48	5,35
C30-50	312,3	846,9	490,2	396,9	223,3	51,16	5,55
C60	533,0	784,3	843,1	0,0	197,5	51,80	3,05
C60-25	521,6	780,6	645,5	182,9	208,2	51,48	3,08
C60-50	525,0	782,0	452,7	366,5	207,5	51,16	3,05

CA – agregado graúdo; NFA – agregado miúdo natural; RFA – agregado miúdo reciclado; FA – agregado miúdo; TA – agregado total.

FONTE: Adaptado de Andrade (2018).

Tabela 36 - Propriedades do concreto com agregado miúdo reciclado.

Misturas	Slump (mm)	f <sub>c</sub> (MPa)	Absorção de Água (%)
C30	85	30,49 (±4,76)	2,90 (±2,47)
C30-25	80	31,96 (±3,30)	5,92 (±6,99)
C30-50	85	31,48 (±2,62)	6,33 (±3,03)
C60	95	60,40 (±2,46)	2,39 (±1,79)
C60-25	120	61,24 (±4,81)	3,66 (±3,93)
C60-50	115	60,23 (±3,44)	4,24 (±0,89)

FONTE: Adaptado de Andrade (2018).

Nos concretos com agregado graúdo reciclado, avaliou-se misturas experimentais REF55, 20RCD55, 40RCD55 com relação a/c=0,55, na qual utilizou-se três teores de substituição (0%, 20% e 40%). A Tabela 37 apresenta a composição das misturas e a Tabela 38 os resultados da caracterização do concreto. Na Tabela 37 também é apresentada a relação entre o teor total de agregado miúdo (FA) e o teor total de agregado (TA), a relação entre teor de agregado total (TA) e teor de cimento, valores necessários para a modelagem teórica da retração.

Tabela 37 - Composição das misturas de concreto com agregado graúdo reciclado.

Misturas	Composição (kg/m <sup>3</sup> )						FA/TA (%)	TA/cimento,g
	cimento	areia fina	areia grossa	brita	ARC	água		
REF55	383	643	214	1320	0	210	39,37	5,68
20RCD55	382	641	214	1054	263	210	39,36	5,68
40RCD55	356	599	200	738	492	196	39,38	5,69

ARC – agregado graúdo reciclado; FA – agregado miúdo; TA – agregado total.

FONTE: Autora (2022).

Tabela 38 - Propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado.

Misturas	Slump (mm)	Espalhamento (mm)	$f_c$ (MPa)	Absorção de Água (%)
REF55	110	410	22,65 (±1,25)	6,06 (±0,08)
20RCD55	120	405	20,75 (±1,74)	6,67 (±0,12)
40RCD55	130	415	23,70 (±2,08)	6,78 (±0,02)

FONTE: Autora (2022).

A precisão de cada modelo estudado foi avaliada pela determinação do coeficiente de erro M%, na qual um erro de até 15% é considerado aceitável. A determinação de M% é dado por (NEVILLE; DILGER; BROOKS, 1983; BROOKS, 2005; GEDAM *et al.*, 2010):

$$M\% = 100 \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum(p-m)^2}{n}} \quad (117)$$

Onde p = valor previsto (teórico), m = valor medido (experimental),  $\bar{m}$  = valor médio medido e n = número de observações.

De acordo com a ACI 209,2R (ACI, 2008), um modelo que poderia prever a retração dentro de 15% seria excelente e 20% seria adequado, enquanto Neville, Dilger e Brooks (1983) consideram 15% como um valor aceitável para a previsão teórica da retração por secagem. Adotou-se nas análises aceitável um erro de 20% e adequado 15%.

Usando o coeficiente de desvio (D%) é possível analisar se os modelos teóricos superestimam (+) ou subestimam (-) os valores de retração de secagem. O coeficiente de desvio (D%) é dado por:

$$D\% = 100 \frac{\sum(p-m)}{n\bar{m}} \quad (118)$$

Para quantificar a diferença encontrada entre as curvas teóricas e experimentais, os valores obtidos pelos modelos teóricos são comparados com os dados experimentais por meio da relação entre eles (valores teóricos / valores experimentais), na qual determinou-se a razão média e o desvio padrão (DP) que foi obtido de acordo a seguinte expressão:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{m})^2}{n}} \quad (119)$$

Onde  $x_i$  = valor na posição i no conjunto de dados,  $\bar{m}$  = valor médio medido e n = número de observações.

Quanto mais próximo o valor da razão média for de 1, mais próximos os valores teóricos estão dos valores experimentais. Se o valor for maior que 1, significa que o modelo superestima a retração e se for menor que 1 ele o subestima. O baixo valor do desvio padrão mostra uniformidade na precisão obtida. Para verificar se o desvio é considerado pequeno e, em seguida, analisar a homogeneidade dos dados determinou-se o coeficiente de variação (CV) que é dado por:

$$CV = \frac{SD}{\bar{m}} \times 100 (\%) \quad (120)$$

O coeficiente de variação (CV%) fornece a variação dos dados obtidos em relação à média. Quanto mais baixo for o seu valor, mais homogêneos são os dados. De acordo com Gardner e Lockman (2001) o modelo é capaz de prever as deformações quando o coeficiente de variação é aproximadamente 20%, já Bazant (2001) considera adequado um coeficiente de variação para retração por secagem de 34%. O coeficiente de variação é considerado baixo, indicando dados homogêneos, quando é menor ou igual a 25%.

As análises foram realizadas com valores teóricos obtidos pelos modelos e os dados experimentais do concreto com agregado miúdo e graúdo reciclado. Posteriormente, a mesma análise foi realizada com os resultados da relação valores teóricos corrigidos/dados experimentais, em que os valores teóricos dos modelos de previsão do concreto com agregado miúdo reciclado foram corrigidos conforme expressão sugerida por Seara-Paz *et al.* (2016).

#### **3.2.4 Propostas modelos de retração**

Verificou-se que muitos modelos utilizam parâmetros associados as propriedades do concreto, no entanto, para prever adequadamente o comportamento a retração do concreto com agregado reciclado, deve-se considerar o agregado reciclado. Apesar de existir modelos para prever a retração do concreto, os mesmos não são aplicáveis ao concreto com agregado reciclado por não considerar o AR na previsão da deformação. Desta forma, sugere-se novas propostas para previsão da retração do concreto com agregado reciclado, conforme exposto a seguir.

### 3.2.4.1 Agregado Miúdo

A partir da análise dos resultados experimentais e com base na abordagem apresentada por Seara-Paz *et al.* (2016), é proposto um novo coeficiente de correção ( $K_c$ ) considerando apenas um termo, conforme apresentado a seguir:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} \cdot K_c \quad (121)$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} \left[ \overbrace{\left( \frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,c,con}} \right)_{t=90 \text{ days}} + 0,80 \cdot RFA}^{\text{coeficiente de correção}} \right] \quad (122)$$

Na qual a retração por secagem ( $\varepsilon_{sh,code}$ ) obtido a partir do modelo teórico é corrigido por  $\left( \frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,c,con}} \right)$  que é razão retração experimental/retração calculada em 90 dias e RFA que é a percentagem de agregado miúdo reciclado.

### 3.2.4.2 Agregado Graúdo

A proposta para correção dos modelos com agregado graúdo é semelhante a utilizada para o concreto com agregado miúdo, no entanto, o coeficiente de correção ( $K_c$ ) considera o teor de agregado graúdo reciclado, conforme exposto a seguir:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} \cdot K_c \quad (123)$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} \left[ \overbrace{\left( \frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,c,con}} \right)_{t=90 \text{ days}} + 0,80 \cdot RGA}^{\text{coeficiente de correção}} \right] \quad (124)$$

Na qual a retração por secagem ( $\varepsilon_{sh,code}$ ) obtido a partir do modelo teórico é corrigido por  $\left( \frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,c,con}} \right)$  que é razão retração experimental/retração calculada em 90 dias e RGA que é a percentagem de agregado graúdo reciclado.

Uma outra proposta é desenvolvida para os concretos com agregado graúdo reciclado sem a necessidade de dados experimentais do concreto convencional. Na qual sugere-se um coeficiente fixo ( $K_r$ ) que corrija os modelos existentes para os concretos com agregado graúdo reciclado considerando a presença de agregado reciclado nos modelos. A nova proposta é baseada nos modelos da NBR 6118 (2014), Modelo II (1978), Modelo CEB-FIB (2010), Eurocode 2 (2008), sendo validados com dados experimentais das misturas com agregado reciclado obtidos deste trabalho, bem como de dados obtidos na literatura (ANDRADE, 2018; AMÁRIO, 2019; BUTTLER, 2003; BRAVO *et al.* 2018), determinando o coeficiente  $K_r$ .

## 4 RESULTADOS

### 4.1 AGREGADOS

#### 4.1.1 Agregados Miúdos

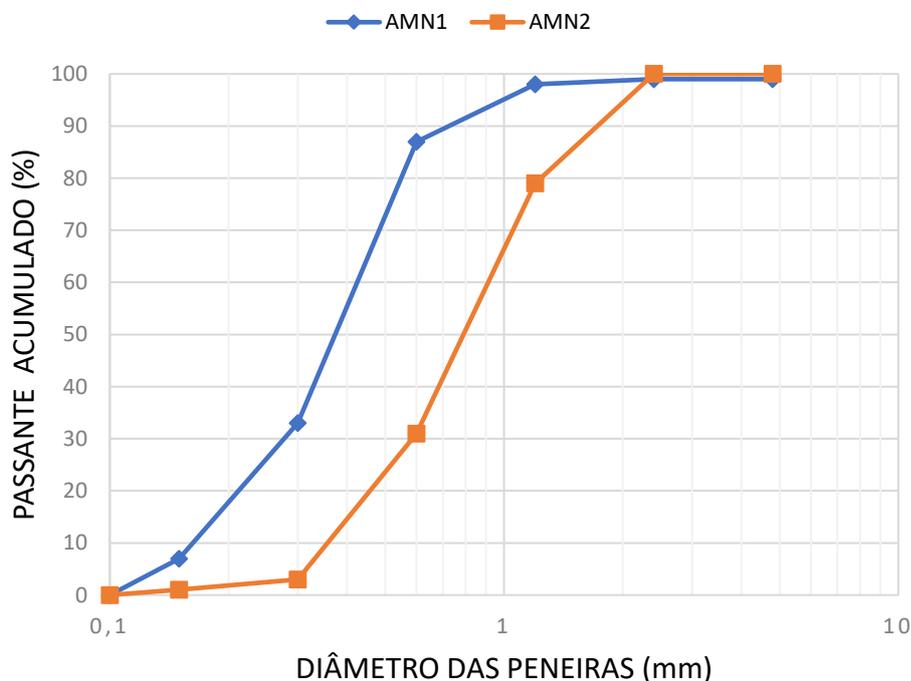
Os resultados de caracterização obtidos para os agregados miúdos AMN1 (agregado miúdo natural fino) e AMN2 (agregado miúdo natural médio) atendem aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2009), os mesmos estão expostos na Tabela 39.

Tabela 39 – Resultado da Caracterização dos Agregados Miúdos.

Propriedades Avaliadas		
Agregados Miúdos	AMN1	AMN2
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	2,4
Módulo de Finura	1,22	2,86
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,61	2,54
Massa Específica SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	2,57
Massa Específica Agregado Seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,62	2,61
Massa Unitária	1,60	1,42
Absorção de água (%)	0,1	0,8

FONTE: Santos (2016).

Figura 45 – Curva Granulométrica dos Agregados Miúdos.



FONTE: Autora (2022).

Conforme estudo de dosagem desenvolvido por Santos (2016), para a produção dos concretos foi utilizada uma mistura de 75% de AMN1 e 25% de AMN2, com o intuito de se obter um agregado miúdo com melhor composição granulométrica e assim, alcançar misturas com melhor desempenho. A curva granulométrica dos agregados miúdos está apresentada na Figura 45. A dimensão máxima característica do agregado miúdo obtido (75%AMN1-25%AMN2) foi de 2,4 mm, e o módulo de finura igual a 2,00 (SANTOS, 2016).

#### 4.1.2 Agregados Graúdos

Os agregados graúdos foram caracterizados de acordo com as normas técnicas e avaliados conforme a ABNT NBR 7211 (2009). Os resultados estão expostos na Tabela 40 e a curva granulométrica dos mesmos está apresentada na Figura 45.

Tabela 40 – Resultado da Caracterização dos Agregados Graúdos.

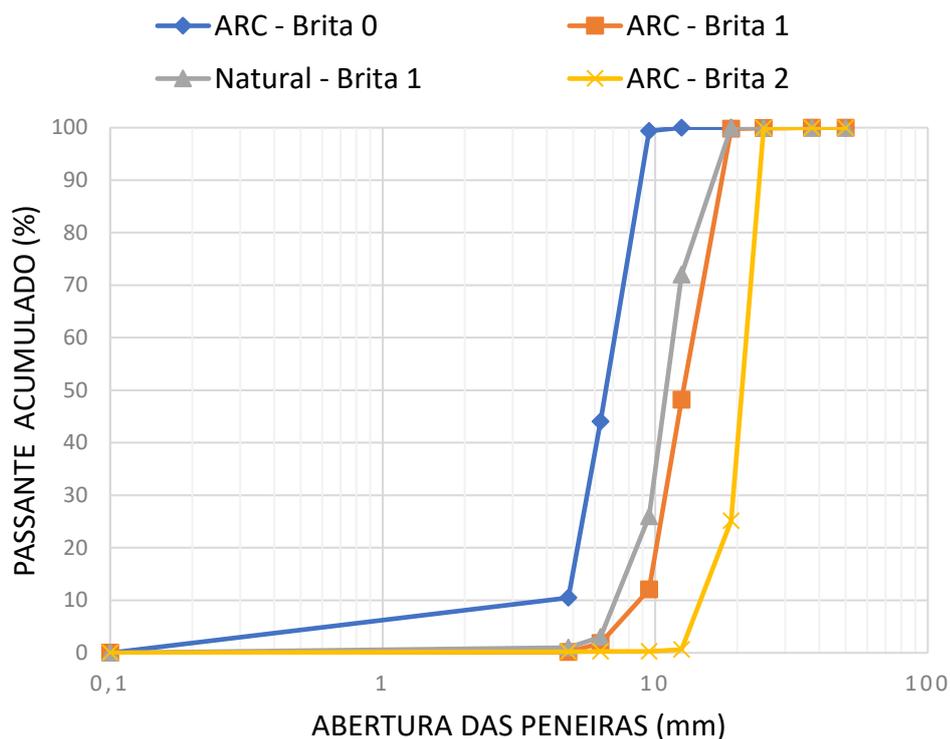
Propriedades Avaliadas	Brita 0 ARC	Brita 1 ARC	Brita 2 ARC	Brita 1 Natural
Dimensão Máxima Característica (mm)	12,5	19,0	37,5	19,0
Módulo de Finura	5,38	6,87	7,73	6,68
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,34	2,43	2,32	2,79
Massa Específica Agregado SSS (g/cm <sup>3</sup> )	2,48	2,54	2,46	2,77
Massa Específica Agregado Seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,71	2,73	2,70	2,76
Absorção (%)	5,8	4,5	6,1	0,4

FONTE: Autora (2022).

Observa-se na Figura 46 que a brita 1 do agregado reciclado é a que apresenta granulometria mais próxima ao do agregado natural. Além disso, a brita 1 de ACR possui a mesma dimensão máxima característica do agregado natural, igual a 19 mm (Tabela 40). Desta forma, a brita 1 é o agregado reciclado selecionado para a confecção dos concretos com ACR. No entanto, vale ressaltar que apesar de apresentarem a mesma dimensão máxima característica, a composição granulométrica desses agregados é diferente.

Conforme Tabela 40, verifica-se que a brita 1 do agregado graúdo reciclado apresentou módulo de finura mais próximo ao do agregado natural, apresentando uma diferença de 2,76%. A massa específica da brita 1 também é a que mais se aproxima do agregado natural, apresentando massa específica aparente 1% inferior ao do agregado natural. Dentre os agregados reciclados, o que apresentou menor absorção foi a brita 1.

Figura 46 – Curva Granulométrica dos Agregados Graúdos.



FONTE: Autora (2022).

Na Tabela 40 é possível verificar que a absorção de água dos agregados graúdos reciclados é superior ao do natural, apresentando aumentos que variam de 11 até 15 vezes mais que o agregado natural. A absorção em 24h é considerada uma estimativa adequada para o agregado reciclado, apesar da absorção continuar aumentando após 24h da realização do ensaio, o aumento não é significativo (BENDIMERAD *et al.*, 2014).

A massa específica do agregado reciclado é menor que a do agregado natural, comportamento esperado conforme a literatura (AMARIO, 2015; RANGEL, 2015; BAI-RAGI *et al.*, 1993; MEDJIGBODO *et al.*, 2018; CARRIJO, 2005) e observado em todos os agregados reciclados como exposto na Tabela 40.

A maior absorção e menor massa específica do ACR é devido a sua maior porosidade, decorrente da argamassa aderida. Esse resultado era esperado, visto que, maiores valores de capacidade de absorção de água resultaram em menores valores de massa específica do agregado, podendo inclusive ser considerado um índice indireto de maior grau de porosidade (BENDIMERAD *et al.*, 2014).

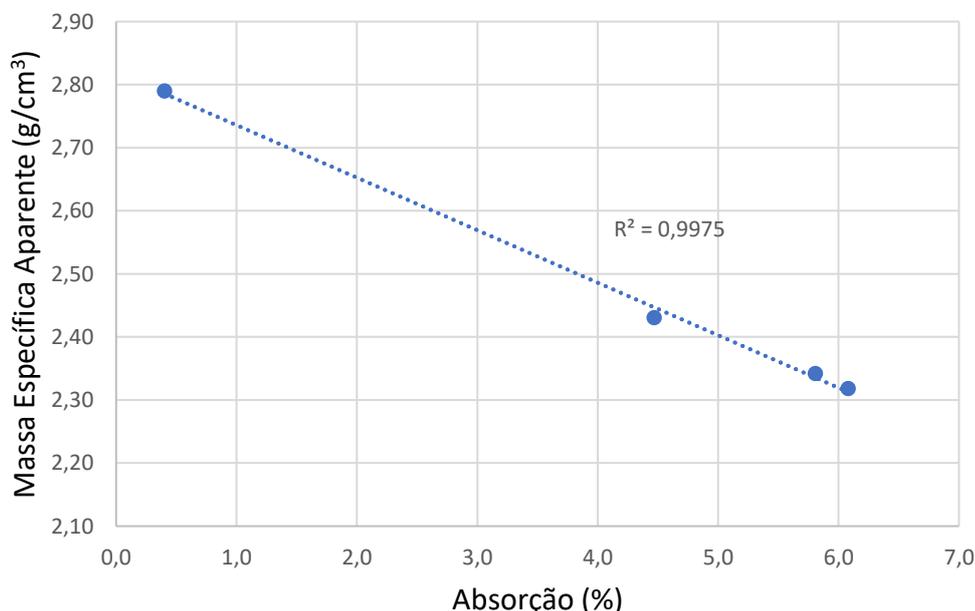
A correlação entre absorção de água e massa específica é exposto na Figura 47, indicando que quanto maior a absorção do agregado reciclado, menor a massa específica, existindo uma tendência linear decrescente entre essas propriedades, resultado semelhante ao de Pepe *et al.* (2018). Pepe (2015) correlaciona à massa específica com a porosidade aberta através da seguinte expressão:

$$\gamma = c_1(1 - c_2A) \quad (125)$$

Na qual  $c_1 = 2700 \text{ kg/m}^3$  representa a massa específica de um agregado fictício em que a porosidade aberta é igual a zero e  $c_2$  é uma constante igual a 2. A porosidade aberta está diretamente relacionada com a absorção de água, sendo referido de forma equivalente como a capacidade de absorção de água (PEPE, 2015).

Verifica-se através da equação (125) proposta por Pepe (2015), que a mesma se adequa aos resultados experimentais dos agregados reciclados (brita 0 ARC, brita 1 ACR e brita 2 ACR), fornecendo os valores de massa específica com coeficiente  $c_2$  igual a 1,9, 2,2 e 2,3, respectivamente.

Figura 47 – Correlação entre os valores de massa específica aparente e absorção.



FONTE: Autora (2022).

O índice de forma, o ensaio de abrasão *Los Angeles* e o teor de argamassa aderida foram determinados apenas para o agregado reciclado equivalente a brita 1. O resultado do índice de forma e abrasão LA estão expostos na Tabela 41.

Tabela 41 – Resultado Índice de Forma e Abrasão dos Agregados Graúdos.

	Brita 1 ACR	Agregado Natural
Índice de forma	2,2	2,6
Abrasão Los Angeles (%)	31,3	39,4

FONTE: Autora (2022).

A forma dos grãos deve atender as recomendações da ABNT NBR 7211 (2009), na qual o índice de forma dos grãos do agregado não deve ser superior a 3. Conforme Tabela 41, tanto o agregado reciclado quanto o natural apresentam valores inferiores a 3, estando de acordo com a recomendação.

O resultado de abrasão LA indica que o agregado reciclado possui perda por abrasão menor que o agregado natural, ou seja, o agregado reciclado apresenta maior resistência ao desgaste superficial que o natural. Este comportamento pode ser atribuído a qualidade da argamassa aderida ao agregado reciclado ser superior ao agregado natural. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura por Verian *et al.* (2013) e Zega e Di Maio (2009), o que confirma que a qualidade da argamassa aderida tem influência na resistência à abrasão, podendo ser mais resistente que o próprio agregado natural.

Silva *et al.* (2014) propõem uma classificação para os agregados de acordo com a absorção de água, massa específica e abrasão LA conforme é apresentado na Tabela 42 e na Figura 48.

Tabela 42 – Requisitos das propriedades físicas para as classes propostas.

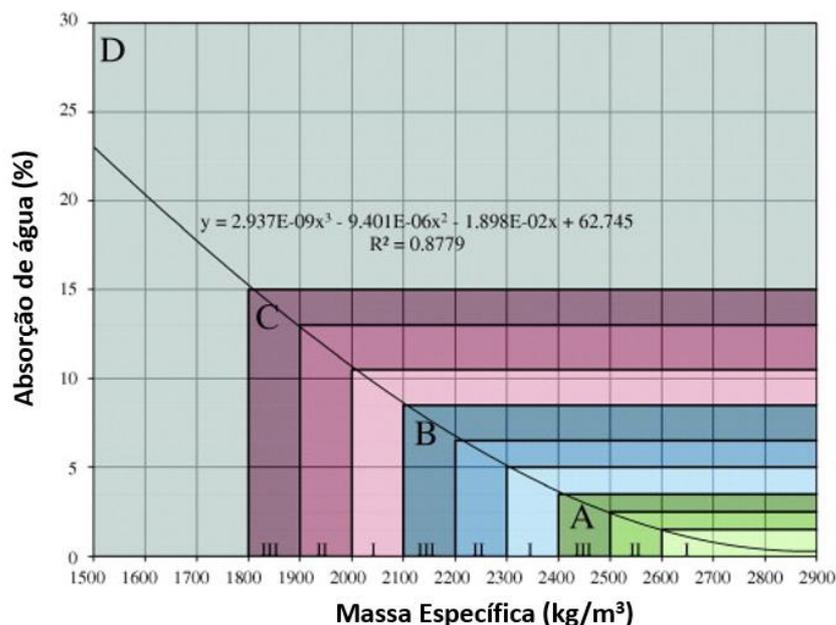
Classe dos Agregados	A			B			C			D
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Massa Específica Seca Mínima (g/cm <sup>3</sup> )	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	Não Limita
Absorção Máxima (%)	1,5	2,5	3,5	5,0	6,5	8,5	10,5	13,0	15,0	
Perda de massa por Abrasão LA (%)	40			45			50			

FONTE: Silva *et al.* (2014).

Conforme classificação de Silva *et al.* (2014), a brita 1 de agregado natural está classificada na classe A (I), já a brita 1 de agregado reciclado está na classe B (I). O agregado reciclado apresenta qualidade inferior ao agregado natural devido a sua

maior absorção de água, que é decorrente da sua maior porosidade devido a presença de argamassa aderida.

Figura 48 – Classificação do agregado baseada na relação entre absorção e massa específica seca.



FONTE: Silva *et al.* (2014).

No entanto, na classificação de Silva *et al.* (2014), o agregado reciclado (brita 1) apresentou perda de massa por abrasão LA e massa específica apropriada para um agregado de classe A, mas o mesmo se classifica na classe B devido a sua maior taxa de absorção de água. Este resultado indica que a capacidade de absorção prevalece sobre a qualidade do agregado reciclado em comparação com as outras propriedades (massa específica e abrasão LA).

O teor de argamassa aderida do agregado reciclado está relacionado a porosidade e conseqüentemente, à qualidade do mesmo. O valor de teor de argamassa obtido para brita 1 de ACR, através do método do choque térmico, foi de 9,9%. De acordo com a classificação proposta na Figura 3 por Rangel *et al.* (2019), esse agregado se enquadra na classe B, devido a sua taxa de absorção de água. Este resultado corrobora com as demais análises que indicam que a absorção de água prevalece sobre a qualidade do agregado reciclado comparado a outros parâmetros. De acordo com Pepe *et al.* (2016) pode-se identificar a qualidade do agregado reciclado levando-se em consideração apenas um parâmetro, a capacidade de absorção de água dos ACRs.

A maior capacidade de absorção de água está relacionada ao teor de argamassa aderida ao agregado reciclado. Desta forma, o teor de argamassa aderida afeta as propriedades do agregado reciclado e está relacionado diretamente à qualidade do mesmo. A classificação proposta por Rangel *et al.* (2019) que é relacionada ao controle de qualidade do ACR permite determinar, com parâmetros convencionais, a quantidade de argamassa aderida (AM), independentemente de sua fonte original. A proposta de Rangel *et al.* (2019) pode ser representada pela Equação 126, expressão desenvolvida por Pepe *et al.* (2016) que permite correlacionar argamassa aderida com a porosidade aberta (capacidade de absorção de água), conforme mostrado a seguir:

$$A = A_{NAT}(1 - AM) + A_{AM}.AM \quad (126)$$

Na qual  $A_{NAT}$  é a porosidade do agregado natural e  $A_{AM}$  é a porosidade da argamassa aderida.

No entanto, no agregado em análise o teor de argamassa aderida sugerido pela proposta ( $10\% < AM < 35\%$ ) foi maior que o determinado experimentalmente (9,9%). A expressão proposta por Pepe *et al.* (2016) não foi capaz de representar a porosidade da brita 1 de ACR, possivelmente, devido a não retirada total da argamassa aderida desses agregados. Conforme os resultados de abrasão Los Angeles, a brita 1 de ACR apresenta resistência ao desgaste superior ao natural, o que dificulta a remoção da argamassa aderida do ACR.

Este resultado é confirmado com a caracterização do agregado reciclado após o ensaio para a retirada da argamassa aderida, conforme exposto na Tabela 43. Os resultados mostram que mesmo após o ensaio para retirada da argamassa, os valores de absorção e massa específica da brita 1 do agregado reciclado sem argamassa aderida (ARCSAM) apresenta valores próximos ao da brita 1 ARC, indicando ainda a presença de argamassa aderida ao agregado. Se houvesse a retirada total da argamassa aderida, os valores da brita 1 ARCSAM estariam mais próximos do agregado natural, o que não ocorre, como visto na Tabela 43.

Tabela 43 – Resultado de absorção e massa específica brita 1.

	Absorção(%)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
Brita 1 Agregado Natural	0,40	2,79
Brita 1 ARC	4,50	2,43
Brita 1 ARCSAM	4,27	2,48

FONTE: Autora (2022).

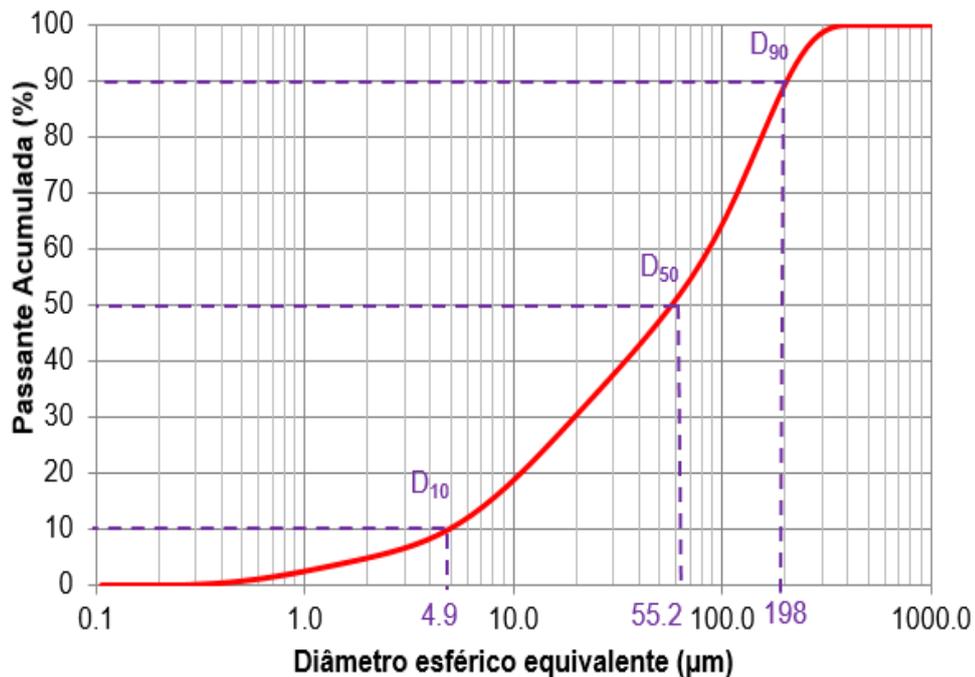
## 4.2 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

### 4.2.1 Caracterização dos materiais

#### 4.2.1.1 Cinza Volante

A Figura 49 mostra a curva granulométrica da cinza volante. Dentre os requisitos físicos estabelecidos na ABNT NBR 12653 (2015) - Materiais pozolânicos – Requisitos, a porcentagem de material retido na peneira 45 $\mu$ m, deve ser inferior a 20%, esta cinza atende a especificação descrita na norma. A massa específica da cinza volante foi de 2,15 g/cm<sup>3</sup>.

Figura 49 – Curva Granulométrica da Cinza Volante.



FONTE: Autora (2022).

### 4.2.2 Caracterização do concreto

#### 4.2.2.1 Caracterização no Estado Fresco

Todas as misturas foram produzidas com o traço base desenvolvido por Santos (2016), devido a semelhança das propriedades do agregado reciclado utilizado pelo autor e a brita 1 disponibilizada pela ACA. Após a produção das misturas foram obtidos os valores de espalhamento utilizando o Método de Espalhamento na Mesa de Graff, os resultados estão expostos na Tabela 44.

Tabela 44 – Resultado do Espalhamento (Método de Graff).

NOMENCLATURA	Espalhamento (mm)
REF65	371
REF55	410
40RCD65	369
40RCD15CV65	359
40RCD30CV65	373
20RCD55	405
40RCD55	415
40RCD55SA	400

FONTE: Autora (2022).

Devido à alta absorção de água dos agregados reciclados, foi necessário utilizar superplastificante nas misturas com ARC, utilizou-se o teor de aditivo na faixa de 0,5% a 1,5%.

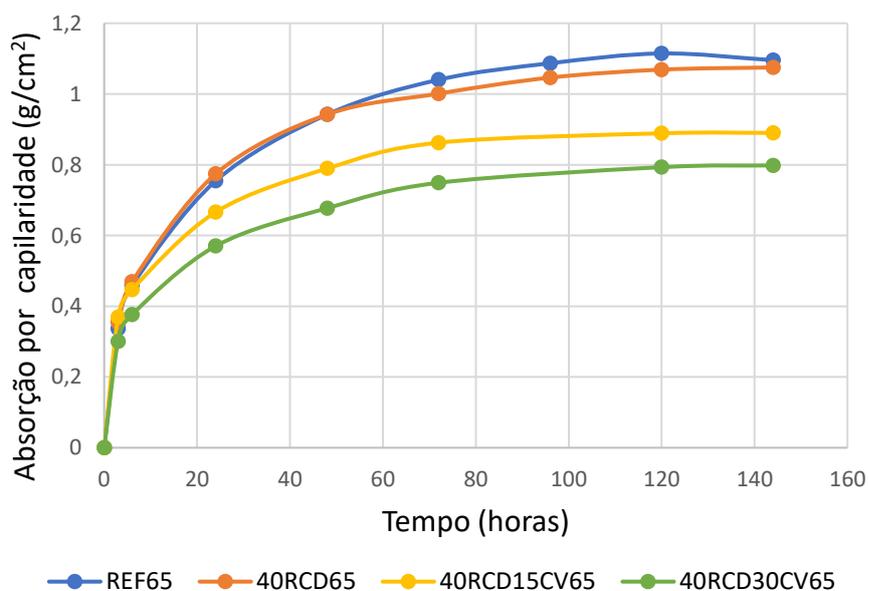
#### 4.2.2.2 Caracterização no Estado Endurecido

##### 4.2.2.2.1 Ensaio Físicos

##### a) Absorção de água por capilaridade

Os resultados de absorção por capilaridade das misturas com relação  $a/c=0,65$  estão expostos na Figura 50.

Figura 50 – Absorção por capilaridade (C) para as misturas com  $a/c=0,65$ .



FONTE: Autora (2022).

O resultado apresentado na Figura 50, indica que a mistura de referência REF65 e 40RCD65 apresentam maior absorção por capilaridade que as misturas contendo cinza volante. As misturas contendo 30% de cinza volante (40RCD30CV65) apresentaram menor absorção de água por capilaridade do que as misturas com 15% (40RCD15CV65). Este resultado indica que a cinza volante contribui para redução da absorção de água por capilaridade. A cinza volante, devido ao efeito filler e ação pozolânica da mesma aumenta o refinamento dos poros e diminui a interconectividade dos mesmos, ou seja, reduz o tamanho e número dos poros capilares, diminuindo a absorção de água por capilaridade das misturas.

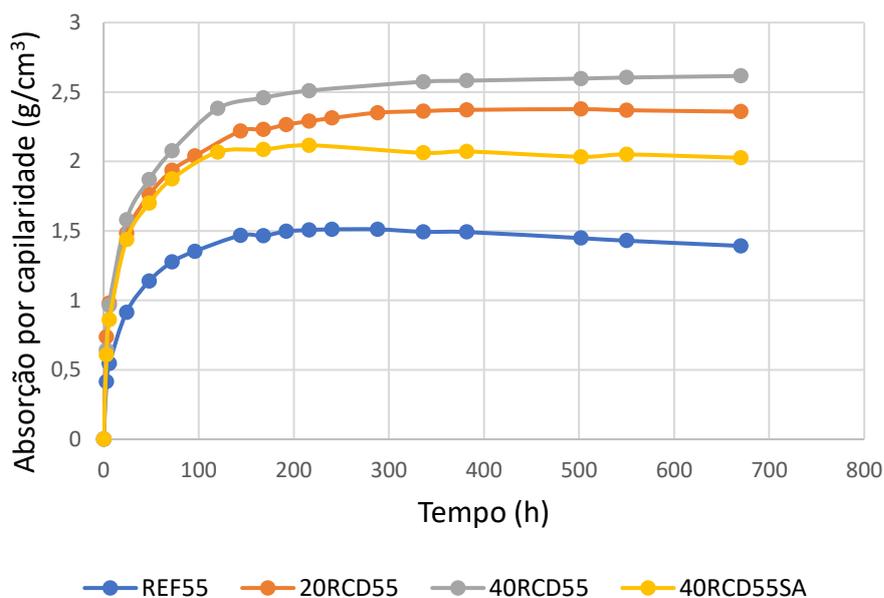
A Figura 50 mostra que a absorção de água aumenta principalmente ao longo das 24h, na qual as misturas com cinza volante tendem a começar a se estabilizar após 72h, já as misturas sem cinza volante, tendem a começar a se estabilizar após 96h de ensaio, indicando a capacidade máxima de absorção com aproximadamente 120h. Essa tendência de estabilização da absorção por capilaridade é identificada através das inclinações das curvas ao longo do tempo, que permanecem constante após se estabilizar.

Observa-se na Figura 50, que a mistura 40RCD65 apresentou até 48h de ensaio um comportamento semelhante ao de referência (REF65), no entanto, ao longo do tempo a absorção reduziu para valores inferiores ao de referência. A menor absorção por capilaridade das misturas contendo ACR indica que o processo de cura interna proporcionado pela presença do agregado reciclado pode reduzir a absorção de água por capilaridade.

A Figura 51 apresenta os resultados de absorção por capilaridade das misturas com relação  $a/c=0,55$ . Observa-se que as misturas com agregado reciclado apresentaram maior capilaridade que REF55, e que quanto maior a quantidade de agregado reciclado, maior a absorção por capilaridade. Este resultado possivelmente, é devido ao fato da presença de agregado reciclado gerar um concreto mais poroso, resultado coerente com a literatura, na qual um concreto mais poroso contribui diretamente com a absorção e percolação da água (MEDEIROS-JUNIOR; MUNHOZ; MEDEIROS, 2019).

Após o ensaio para a retirada da argamassa aderida (40RCD55SA), conforme esperado, houve uma redução da absorção por capilaridade, apresentando um valor intermediário entre REF55 e 40RCD55SA.

Figura 51 – Absorção por capilaridade (C) para as misturas com  $a/c=0,55$ .



FONTE: Autora (2022).

Os resultados das misturas com relação  $a/c=0,65$  e  $a/c=0,55$  não foram comparados, pois os ensaios foram realizados de forma distinta. Nas misturas com relação  $a/c=0,65$  os corpos de prova não foram isolados do ambiente, enquanto as misturas com  $a/c=0,55$  foram isoladas. Isto justifica o fato das misturas com relação  $a/c=0,65$  apresentarem menor valor de absorção por capilaridade que as com relação  $a/c=0,55$ , pois o esperado é que a absorção de água por capilaridade aumente com a relação água/cimento (MEDEIROS-JUNIOR; MUNHOZ; MEDEIROS, 2019).

#### b) Absorção de água, Índice de vazios e Massa Específica

Os resultados de absorção de água por imersão (porosidade), índice de vazios e massa específica de todas as misturas estão dispostos na Tabela 45.

Os resultados apresentados na Tabela 45 são coerentes com a literatura (LEITE, 2001; LIMA, 1999; VERIAN *et al.*, 2018; DONG *et al.*, 2013), visto que os concretos com agregado graúdo reciclado apresentaram maiores valores de absorção por imersão, maior índice de vazios e menor massa específica que o concreto com agregado natural (REF). Este comportamento é devido a presença de ACR que é mais poroso que o agregado natural em decorrência da argamassa aderida.

Observa-se na mistura 40RCD55SA que após o ensaio para a retirada de argamassa aderida, ocorreu uma redução da absorção por imersão (4,07%) e índice de

vazios (3,46%) comparado aos concretos 40RCD55. No entanto, os valores das misturas 40RCD55SA não se aproximam do concreto REF55, o que indica ainda existir presença de argamassa aderida.

Tabela 45 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Misturas	Absorção por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )
REF65	6,34	14,23	2,24
REF55	6,06	13,60	2,24
40RCD65	6,85	15,04	2,20
40RCD15CV65	7,09	15,39	2,17
40RCD30CV65	7,43	16,09	2,17
20RCD55	6,67	14,61	2,19
40RCD55	6,78	15,06	2,22
40RCD55SA	6,50	14,54	2,24

FONTE: Autora (2022).

As misturas com relação  $a/c=0,55$  apresentam menor absorção por imersão e índice de vazios que as misturas com  $a/c=0,65$ , como verifica-se na Tabela 45. Este comportamento era esperado, visto que concretos com maiores relações  $a/c$  tendem a perder mais água durante o processo de hidratação, gerando uma matriz cimentícia mais porosa. Na medida que a relação água/cimento aumenta, também aumenta a absorção (MEDEIROS-JUNIOR; MUNHOZ; MEDEIROS, 2019). Resultado confirmado por Pinto *et al.* (2018) e Zhang e Zong (2014), visto que a porosidade e permeabilidade do concreto são parâmetros influenciados pela relação  $a/c$ .

A presença de cinza volante gera um aumento na absorção por imersão em relação 40RCD65, em 3,5% e 8,5%, respectivamente, para 40RCD15CV65 e 40RCD30CV65. Observa-se um acréscimo da absorção por imersão após o aumento da taxa de substituição de cimento por cinza volante, resultado semelhante são encontrados por Dinakar *et al.* (2013). Com relação ao índice de vazios, há um aumento em 2,3% para 40RCD15CV65 e 6,9% para 40RCD30CV65 em relação 40RCD65. A massa específica reduz 1,4% e 1,8%, respectivamente, para 40RCD15CV e 40RCD30CV65.

O teste por absorção de água por imersão avalia a porosidade do concreto, no entanto, o mesmo apresenta algumas limitações, pois o ensaio mede apenas o volume de poros acessíveis, ou seja, a porosidade aberta (SILVA; BRITO, 2015). De acordo com Coutinho (1998), a porosidade aberta não representa a porosidade absoluta do concreto, pois não considera o volume de poros fechados. O resultado indica

que a cinza volante pode ter aumentado a porosidade aberta das misturas, aumentando a quantidade de macroporos, mas este resultado não representa a porosidade absoluta das misturas.

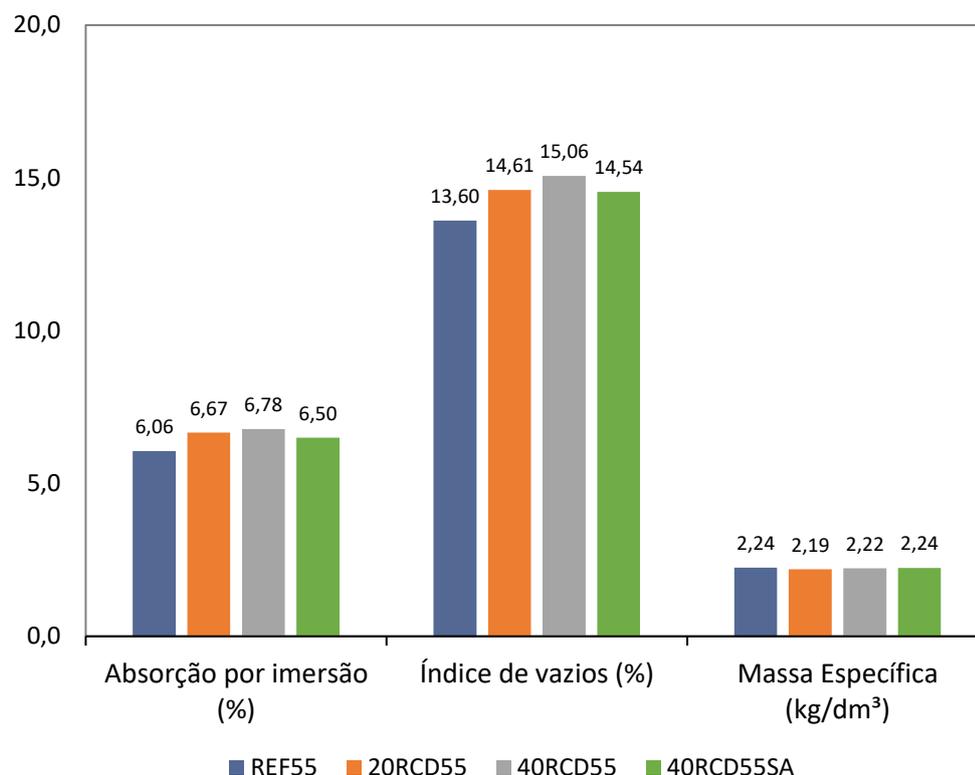
A formação de macroporos pode estar associada a saída de água em excesso das misturas contendo cinza volante, pois nestas misturas há uma maior quantidade de finos que tende a adsorver mais água. A água em excesso pode não reagir na formação dos hidratos, que com a sua saída ocasiona a formação de vazios.

No entanto, os resultados de absorção por capilaridade indicam uma redução no tamanho dos poros capilares, isto pode ocorrer devido ao efeito físico da adição pozolânica que proporciona o refinamento dos poros e diminui a interconectividade do mesmo. Este resultado é confirmado por Silva e Brito (2015), na qual afirmam que às misturas com maiores coeficientes de absorção, ou seja, uma absorção mais rápida, terão mais poros capilares de maior tamanho e que às misturas com menores coeficientes de absorção, absorção mais lenta, possuem poros capilares de tamanho menor. Desta forma, os resultados encontrados confirmam a afirmação dos autores na qual é possível obter misturas com um maior número de macroporos ligados ao exterior e entre si por uma rede de microporos ou pequenos poros capilares.

A Figura 52 apresenta os resultados para as misturas com relação  $a/c=0,55$ , observa-se que quanto maior o teor de substituição por agregado reciclado, maior a absorção por imersão e índice de vazios. Resultado coerente com o esperado, visto que a maior quantidade de agregado reciclado, resulta em um concreto mais poroso, e conseqüentemente, com maior absorção de água e índice de vazios. Com relação aos valores de massa específica, houve pequena variação de 0,89% a 2,23%, mostrando ter pouca influência nessa propriedade.

No concreto sem argamassa aderida (40RCD55SA), ocorreu uma redução na absorção por imersão (4,13%) e índice de vazios (3,45%) em relação ao concreto com argamassa aderida (40RCD55), conforme o esperado. No entanto, o concreto 40RCD55SA não apresenta valores da absorção por imersão e índice de vazios, próximos ao de referência (REF55), confirmando os resultados encontrados anteriormente, indicando ainda a existência de argamassa aderida.

Figura 52 – Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica para as misturas com a/c=0,55.



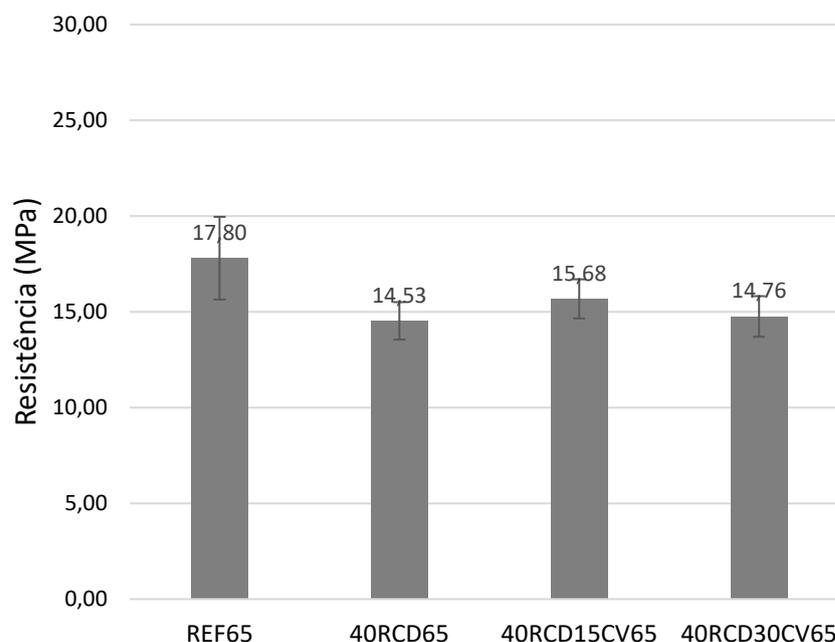
FONTE: Autora (2022).

#### 4.2.2.3 Ensaio Mecânicos

##### a) Resistência à Compressão

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, nos concretos com relação a/c=0,65, são apresentados na Figura 53. A presença do agregado reciclado reduziu a resistência do concreto em 18,37%, este resultado está coerente com a literatura, na qual a diminuição na resistência dos concretos com agregado reciclado pode atingir até 30% (LIMA, 1999). A substituição dos agregados naturais por agregados graúdos reciclados modifica a resistência à compressão do concreto, apresentando geralmente menores valores que o concreto com agregado natural, resultado semelhante ao Xiao *et al.* (2012).

Figura 53 – Resultados da resistência à compressão ( $a/c=0,65$ ).



FONTE: Autora (2022).

As misturas com 40% de ACR contendo cinza volante, 40RCD15CV65 e 40RCD30CV65, apresentaram um aumento na resistência de 7,91% e 1,58%, respectivamente, comparado ao 40RCD65. Verifica-se na Figura 53 que ao aumentar o teor de cinza volante para 30% o aumento da resistência foi menor que com 15%. O resultado indica que a cinza volante tende a melhorar o desempenho mecânico do concreto, pois a mesma proporciona o preenchimento dos vazios e sua propriedade pozo-lânica favorece a formação de C-S-H que apresenta maior volume que o hidróxido de cálcio consumido na reação pozo-lânica, proporcionando um aumento da resistência do concreto.

Este resultado é semelhante ao de Silva e Brito (2015) que afirmam que o melhor desempenho dos concretos com cinza volante pode ser atribuído ao refinamento da microestrutura da matriz de pasta de cimento, através do preenchimento da estrutura porosa pelos produtos de hidratação, tornando-a menos interligada. Cabe ressaltar que ocorreu uma diminuição da resistência (5,87%) do concreto 40RCD15CV65 para 40RCD30CV65 com 30% de cinza volante, resultado semelhante é encontrado por Kou *et al.* (2011) na qual a substituição de cimento por 35% cinza volante diminuiu a resistência à compressão. A adição, como a cinza volante, além do efeito químico tem o efeito filler que preenche os vazios do concreto, melhorando a

resistência à compressão. No entanto, o excesso de adição pode gerar a redução da resistência do concreto devido ao efeito inverso, ocasionando o afastamento dos grãos e reduzindo o desempenho.

Os resultados de resistência à compressão indicam que as misturas com cinza volante apresentaram um desempenho superior ao concreto 40RCD65, apesar dos resultados de absorção por imersão e índice de vazios indicarem que o concreto com cinza volante é mais poroso que 40RCD65. Este comportamento pode ser explicado pelo método de mistura em dois estágios desenvolvido por Tam *et al.* (2005), pois as misturas com cinza volante apresentam menos quantidade de pasta na zona de transição contribuindo com o travamento mecânico, e conseqüente, aumentando a resistência do concreto. Segundo Tam *et al.* (2005), a abordagem de mistura de dois estágios (TSMA) pode aumentar a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado, desenvolvendo uma zona interfacial mais forte, e que à medida que a força de adesão do agregado a pasta aumenta, a resistência do concreto também aumenta.

Os resultados confirmam as afirmações de Silva e Brito (2015) e Coutinho (1998) de que o ensaio de absorção por imersão não representa a porosidade absoluta. Desta forma, a porosidade obtida neste ensaio indica não ser um critério adequado para atestar o desempenho do concreto, o que ratifica as afirmações de Solís-Carcaño e Moreno (2006) e Mendoza-Rangel *et al.* (2016) de que a porosidade não avalia de forma adequada a qualidade do concreto.

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias nos concretos com relação  $a/c=0,55$ , são apresentados na Figura 54. Verifica-se uma diminuição na resistência (8,38%) no concreto com 20% de RCD (20RCD55) comparado ao de referência (RCD55). Resultado esperado, visto que a incorporação do ACR tende a reduzir a resistência do concreto. No entanto, ao se utilizar 40% de RCD (40RCD55), há um aumento na resistência (4,63%) comparado ao RCD55, enquanto que no 40RCD65 houve uma redução com relação ao RCD65. Este resultado confirma a influência da relação  $a/c$  na resistência à compressão do concreto com agregado reciclado, e que em alguns casos, é possível obter maior resistência no concreto com ACR que no concreto sem agregado reciclado, conforme também afirma Amario (2015).

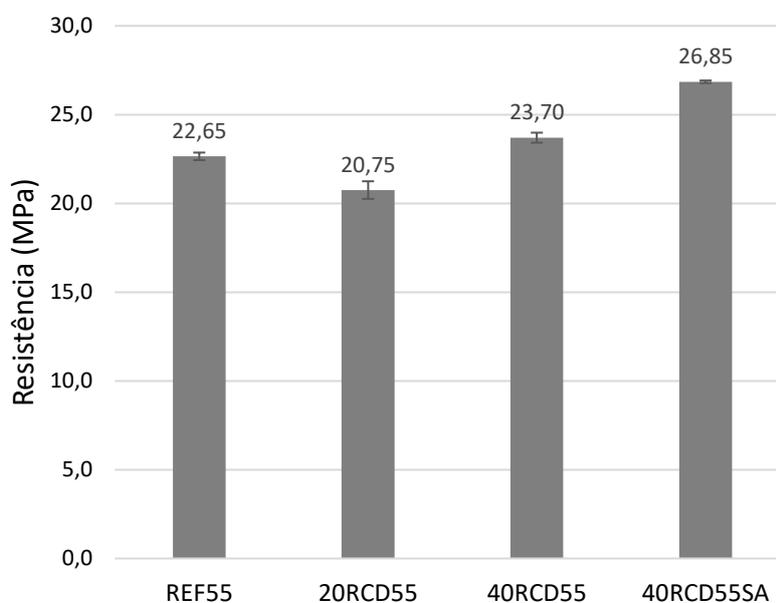
O aumento na resistência pode ser em decorrência de vários fatores associados, além da relação  $a/c$ , a própria composição do resíduo, conforme Rao *et al.*

(2007), pois a resistência e qualidade do resíduo de concreto afetam o comportamento mecânico do concreto com ACR (PUTHUSSERY *et al.*, 2017). Além dos fatores do próprio agregado, o procedimento de mistura adotado, mistura de dois estágios (TSMA) de Tam *et al.* (2005), pode aumentar a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado.

A natureza porosa do agregado reciclado, no processo de pré-mistura utilizado no TSMA, permite preencher poros e fissuras, resultando em um concreto mais denso e uma melhor zona de transição em torno do agregado reciclado, gerando um concreto com resistência superior, conforme Tam *et al.* (2005). De acordo com Andrade *et al.* (2020), mesmo os concretos com agregado reciclado sendo mais porosos, existe uma alta adesão dos agregados reciclados a pasta, o que aumenta a interface pasta-agregado, o que pode ocasionar maiores resistências.

Na Figura 54, observa-se que no concreto com ACR após o ensaio para retirada da argamassa aderida (40RCD55SA), houve um aumento na resistência de 18,54% e 13,29%, em relação a RCD55 e 40RCD55, respectivamente. A retirada da argamassa deferida, possivelmente ocasionou um agregado mais rugoso e com uma área superficial maior em contato com a pasta, o que proporciona uma maior resistência. Conforme Leite (2001), uma textura mais rugosa, melhoram a aderência entre a pasta e o agregado, e assim pode melhorar o desempenho final dos concretos.

Figura 54 – Resultados da resistência à compressão ( $a/c=0,55$ ).

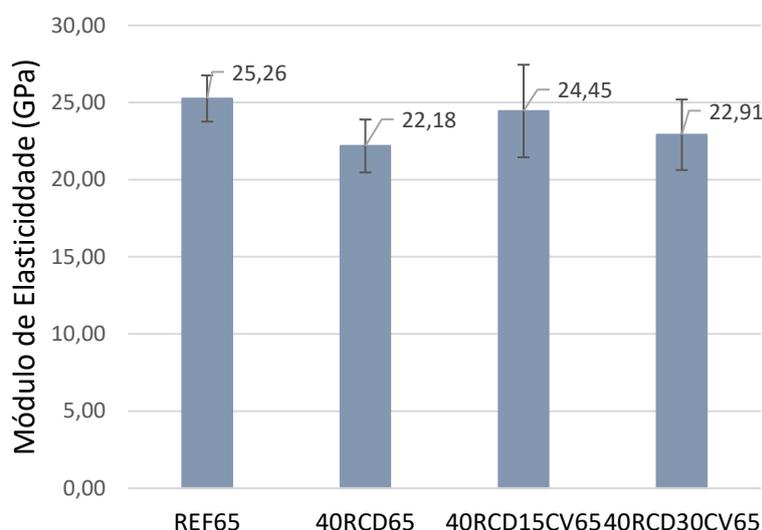


FONTE: Autora (2022).

## b) Módulo de Elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade do concreto com relação  $a/c=0,65$  estão expostos na Figura 55. Na qual o concreto com 40RCD65 apresentou menor módulo de elasticidade que o concreto de referência, apresentando uma diferença de 12,19%. Este resultado é coerente com a literatura, resultados semelhantes são encontrados por Cabral *et al.* (2010), Etxeberria *et al.* (2007), Safiuddin *et al.* (2013) e Dong *et al.* (2013). Na qual Etxeberria *et al.* (2007) obteve uma redução de 12,19% do módulo de elasticidade, no concreto com 50% de teor de substituição comparado ao concreto com agregado natural, e Dong *et al.* (2013) teve de 11,69%. A presença de agregado reciclado tende a diminuir o módulo de elasticidade do concreto devido a fração mais deformável da argamassa antiga aderida ao agregado reciclado.

Figura 55 – Resultados de módulo de elasticidade ( $a/c=0,65$ ).



FONTE: Autora (2022).

A presença de cinza volante nos concretos com 40% de ACR proporcionou um aumento no módulo de elasticidade em 10,23% e 3,29%, respectivamente, para 15% e 30% de cinza volante. Este comportamento é coerente com os resultados encontrados na resistência à compressão, na qual a presença de cinza volante aumentou a resistência do concreto com agregado reciclado, e para teores de substituição de 30% de cinza volante o aumento foi inferior do que com 15% de cinza volante, assim como ocorreu no módulo de elasticidade.

O resultado indica que a cinza volante tende a aumentar o módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado, proporcionando uma menor deformação do mesmo, devido a seu efeito filler e as reações pozolânicas que proporcionam uma

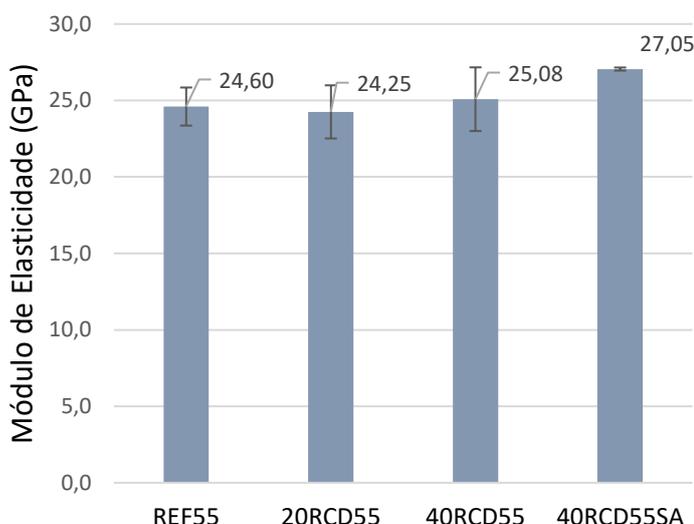
matriz cimentícia mais densa. Além disso, a argamassa aderida ao agregado reciclado aumenta a reação pozolânica da cinza volante, conforme Lothenbach *et al.* (2011) e Kou e Poon (2013).

No entanto, observa-se na Figura 55, que ao aumentar o teor de cinza volante de 15% para 30% há uma redução no módulo de elasticidade (6,29%), o que indica que teores de 30% já podem afetar negativamente o módulo de elasticidade.

Os resultados de módulo de elasticidade dos concretos com relação  $a/c=0,55$  estão na Figura 56. Os resultados obtidos, seguem o esperado de acordo com a resistência à compressão, na qual a mistura 20RCD55 apresenta uma redução no módulo de elasticidade (1,43%), e para o concreto 40RCD55 ocorre um aumento no módulo de elasticidade (1,95%) em relação ao REF55. Após o ensaio da retirada da argamassa aderida (40RCD55SA) há um aumento no módulo de elasticidade, 9,96% e 1,96%, em relação a RCD55 e 40RCD55, respectivamente.

Apesar da tendência do agregado reciclado reduzir o módulo de elasticidade do concreto, devido a sua estrutura mais porosa, que proporciona uma maior deformação que o agregado natural, os resultados indicam que é possível obter concretos com ACR com deformação inferior ao do agregado natural, ou seja, módulo de elasticidade maior, devido a diversos fatores como relação  $a/c$ , as próprias características do agregado reciclado, e até mesmo o projeto e procedimento de mistura adotado. Tam e Tam (2007) afirmam que a deformação dos concretos com ACR podem ser melhoradas com o procedimento de mistura TSMA.

Figura 56 – Resultados de módulo de elasticidade ( $a/c=0,55$ ).



FONTE: Autora (2022).

Existem algumas expressões na literatura que permitem estimar o módulo de elasticidade do concreto em função da resistência à compressão, como a proposta pela NBR 6118 (2014) e ACI (BAZANT; BAWEJA, 2001).

A expressão dada pela NBR 6118 (2014):

$$E_{NBR\ 6118} = 5600\sqrt{f_{ck}} \text{ (MPa)} \quad (127)$$

A expressão da ACI (BAZANT; BAWEJA, 2001):

$$E_{ACI} = 4738\sqrt{f_{ck}} \text{ (MPa)} \quad (128)$$

A Tabela 46 apresenta os valores obtidos com as Equações (127) e (128), bem como os valores experimentais para o módulo de elasticidade das diferentes misturas. Além disso, determinou-se a relação módulo teórico/módulo experimental, para determinar os valores teóricos que mais se aproximam dos dados experimentais. Quanto mais próxima de 1 for a razão média, significa que os valores teóricos estão próximos dos experimentais. A razão média obtida para a expressão proposta pela NBR 6118 (2014) foi de  $1 \pm 0,08$  e para o ACI (BAZANT; BAWEJA, 2001) obteve-se valor médio de  $0,85 \pm 0,06$ , o que mostra que a expressão proposta pela NBR 6118 (2014) se adequa bem para os dados experimentais obtidos.

Tabela 46 – Relação teórico/experimental do módulo de elasticidade.

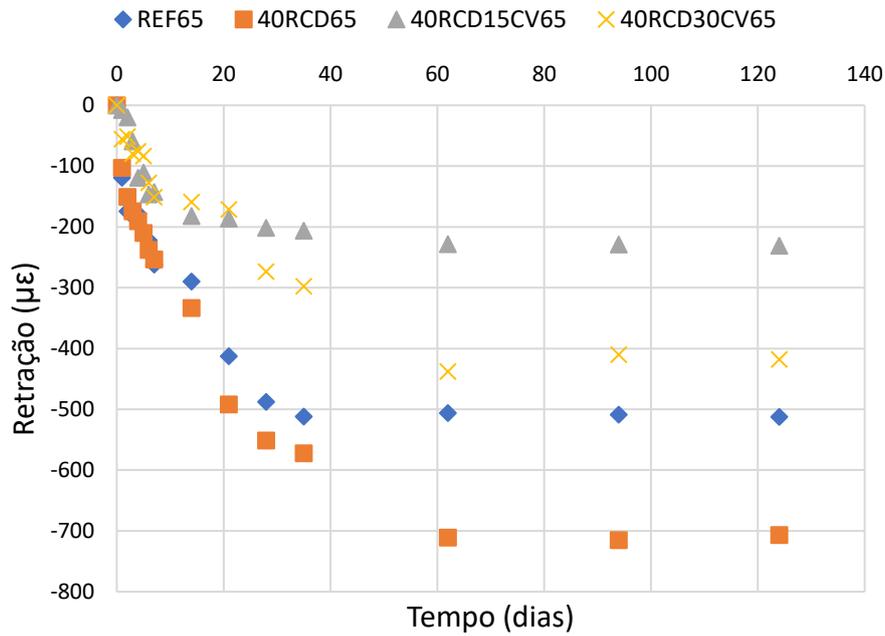
Misturas	$E_{\text{experimentalL}}$ (GPa)	$E_{NBR\ 6118}$ (GPa)	$E_{ACI}$ (GPa)	$E_{NBR\ 6118}/$ $E_{\text{experimental}}$	$E_{ACI}/$ $E_{\text{experimental}}$
REF65	25,26	23,63	19,96	0,94	0,79
REF55	24,60	26,65	22,51	1,08	0,92
40RCD65	22,18	21,35	18,03	0,96	0,81
40RCD15CV65	24,45	22,17	18,73	0,91	0,77
40RCD30CV65	22,91	21,51	18,17	0,94	0,79
20RCD55	24,25	25,51	21,55	1,05	0,89
40RCD55	25,08	27,26	23,03	1,09	0,92

FONTE: Autora (2022).

### 4.2.3 Retração

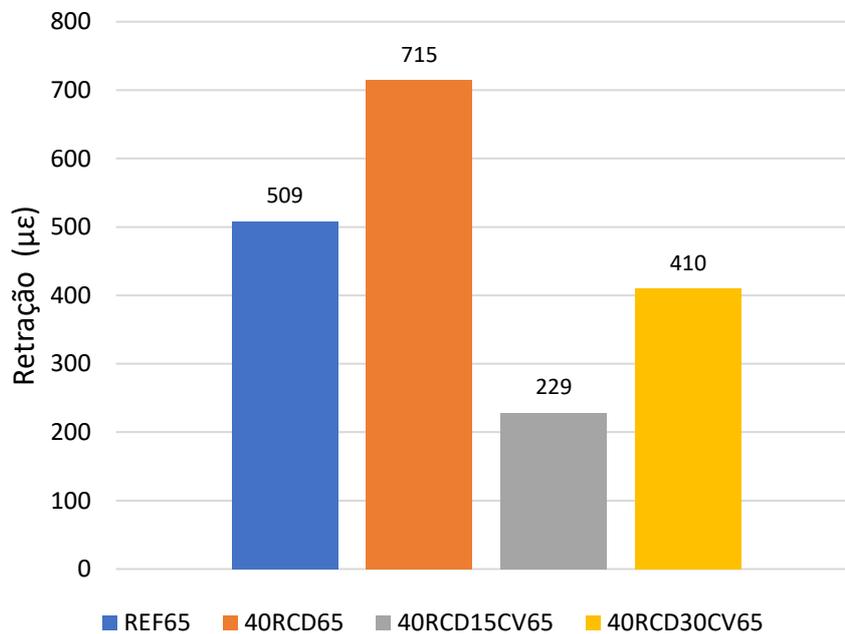
A Figura 57 apresenta a retração por secagem ao longo do tempo para as misturas com relação  $a/c=0,65$  e na Figura 58 estão os valores de retração aos 95 dias dessas misturas.

Figura 57 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) ao longo do tempo ( $a/c=0,65$ ).



FONTE: Autora (2022).

Figura 58 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) aos 95 dias ( $a/c=0,65$ ).



FONTE: Autora (2022).

Na Figura 57, verifica-se que a retração por secagem no concreto 40RCD65 foi maior que nas demais misturas e que a utilização de cinza volante reduziu a retração por secagem para valores inferiores ao concreto de referência (REF65), sem o uso de

ACR. As cinzas volantes são conhecidas por sua capacidade de reduzir as deformações de retração, promovem uma redução das tensões internas reduzindo as fissuras por retração (LIMBACHIYA *et al.*, 2012).

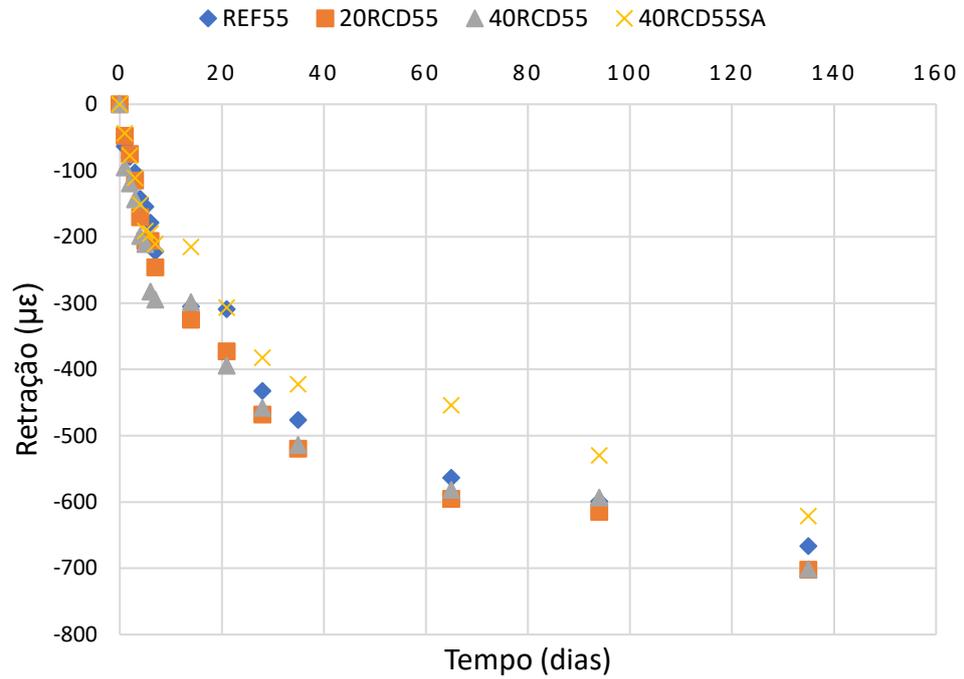
Segundo Limbachiya *et al.* (2012), a inclusão de 30% de cinza volante no concreto com diferentes valores de relação água/cimento, resultou em uma redução da deformação por retração de até 37% quando comparado aos concretos com apenas Cimento Portland. Verifica-se na Figura 58, que a redução na retração foi de aproximadamente, 55% e 19% em relação ao concreto REF65, para as misturas com 15% (40RCD15CV65) e 30% de cinza volante (40RCD30CV65), respectivamente.

Os resultados apresentados na Figura 58 mostram que o uso de agregados reciclados (40RCD65) aumentou a retração do concreto em 40,56%, comparado ao concreto sem ACR (REF65). O concreto com agregado reciclado tende a apresentar maior retração do que um concreto com agregado natural (SILVA *et al.*, 2015a). Os resultados de retração obtidos são coerentes com os valores de módulo de elasticidade, na qual o módulo de elasticidade da mistura 40RCD65 foi inferior a REF65, o que indica que a deformação da 40RCD65 é superior a REF65, confirmado através dos resultados de retração.

O aumento na retração por secagem do concreto com agregado reciclado em comparação com o agregado convencional, é em decorrência da presença de uma maior quantidade de pasta de cimento, devido a presença de argamassa antiga mais a argamassa nova nos concretos com agregados reciclados (MEDJIGBODO *et al.*, 2018). No entanto, a influência do agregado reciclado na retração não poder ser generalizada, pois existem outros parâmetros de influência que devem ser considerados.

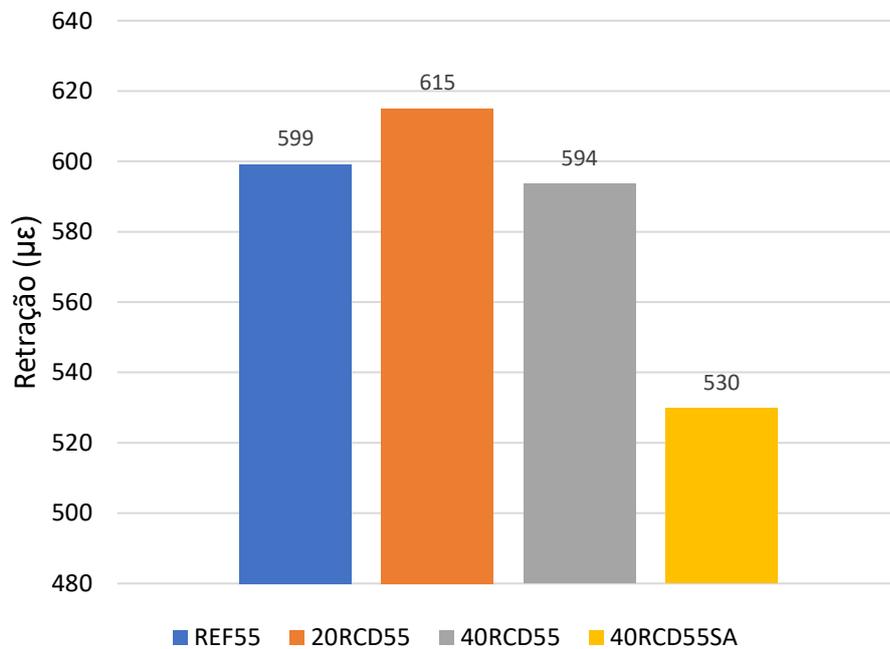
A Figura 59 apresenta a retração por secagem ao longo do tempo das misturas com relação  $a/c=0,55$  e na Figura 60 estão os valores de retração aos 95 dias dessas misturas. Os resultados da Figura 59 mostram que o concreto sem argamassa aderida (40RCD55SA) apresenta valores de retração inferiores as demais misturas. Os valores de retração são analisados aos 95 dias para compará-los aos resultados dos concretos com relação  $a/c=0,65$ .

Figura 59 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) ao longo do tempo ( $a/c=0,55$ ).



FONTE: Autora (2022).

Figura 60 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) aos 95 dias ( $a/c=0,55$ ).

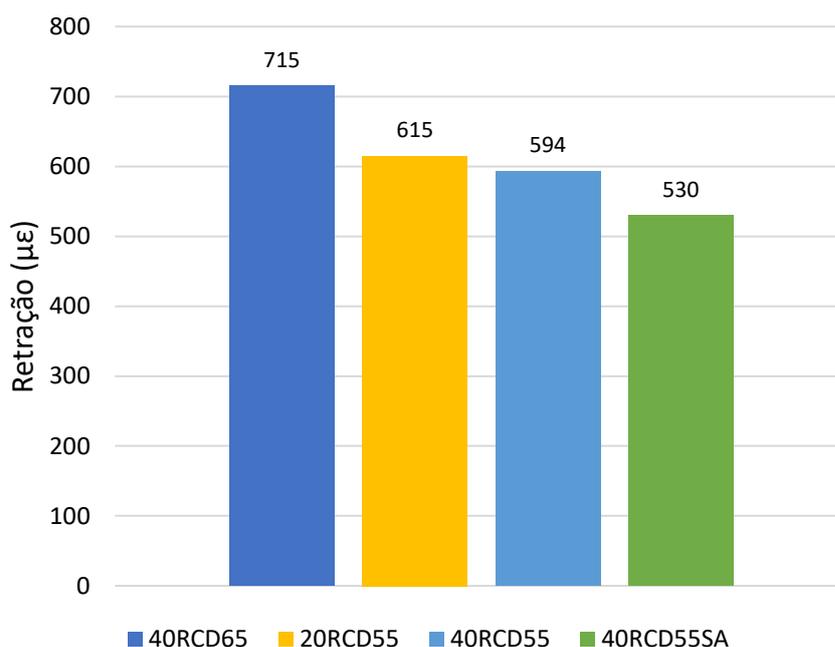


FONTE: Autora (2022).

Os resultados apresentados na Figura 60, mostram que os concretos 20RCD55 apresentaram maiores valores (2,5%) de retração que os de referência (REF55), e que aumentar o teor de substituição para 40% (40RCD55) ocorreu uma redução (0,9%) na retração. Resultado coerente com os módulos de elasticidades dessas misturas, na qual podem ser considerados estatisticamente iguais. Desta forma, percebe-se que é possível obter concretos com ACR com desempenho semelhante as misturas sem agregado reciclado utilizando o método de mistura TSMA (Tam e Tam, 2007).

No entanto, a relação a/c é um fator de influência no desempenho a retração dos concretos, como observado na Figura 61 que apresenta o comportamento a retração dos concretos com ACR nos diferentes valores de relação a/c. Na qual observa-se que a retração dos concretos com ACR de relação a/c=0,65 apresentou valores de retração superiores as demais misturas, pois existe uma tendência de quanto maior a relação a/c, maior a retração (Seara-Paz *et al.*, 2016).

Figura 61 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) aos 95 dias concretos com ARC.



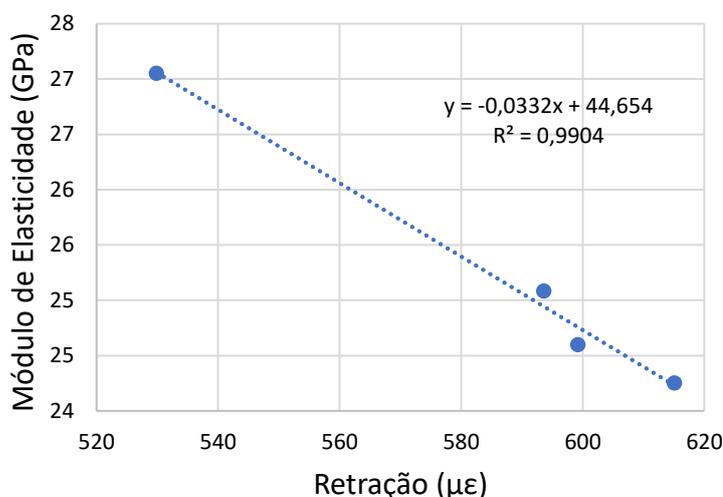
FONTE: Autora (2022).

Os valores da retração do concreto com agregado graúdo reciclado variaram de 229  $\mu\epsilon$  a 715  $\mu\epsilon$  aos 95 dias. Esses valores são consistentes com os apresentados por outros autores (GONZALEZ-COROMINA E ETXEBERRIA, 2016; SEARA-PAZ *et al.*, 2016; PEDRO *et al.*, 2017), que identificaram valores de retração variando de 185  $\mu\epsilon$  a 765  $\mu\epsilon$  para concretos contendo apenas agregado reciclado graúdo ou miúdo e graúdo, como substituição total ou parcial do agregado natural.

#### 4.2.3.1 Retração e Módulo de Elasticidade

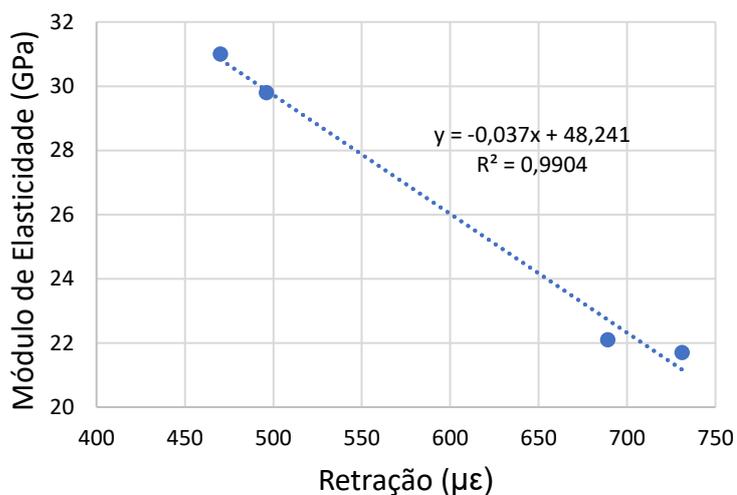
A Figura 62 apresenta a correlação entre módulo de elasticidade e retração por secagem dos concretos com relação  $a/c=0,55$ . Existe uma boa correlação entre esses parâmetros, indicando que quanto maior o módulo de elasticidade do concreto, menor a retração, existindo uma tendência linear decrescente entre essas propriedades. Esse comportamento também é observado com os dados de Amario (2019), conforme exposto na Figura 63.

Figura 62 – Relação entre módulo de elasticidade (GPa) e retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) aos 95 dias dos concretos  $a/c=0,55$ .



FONTE: Autora (2022).

Figura 63 – Relação entre módulo de elasticidade (GPa) e retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) dados de Amario (2019).

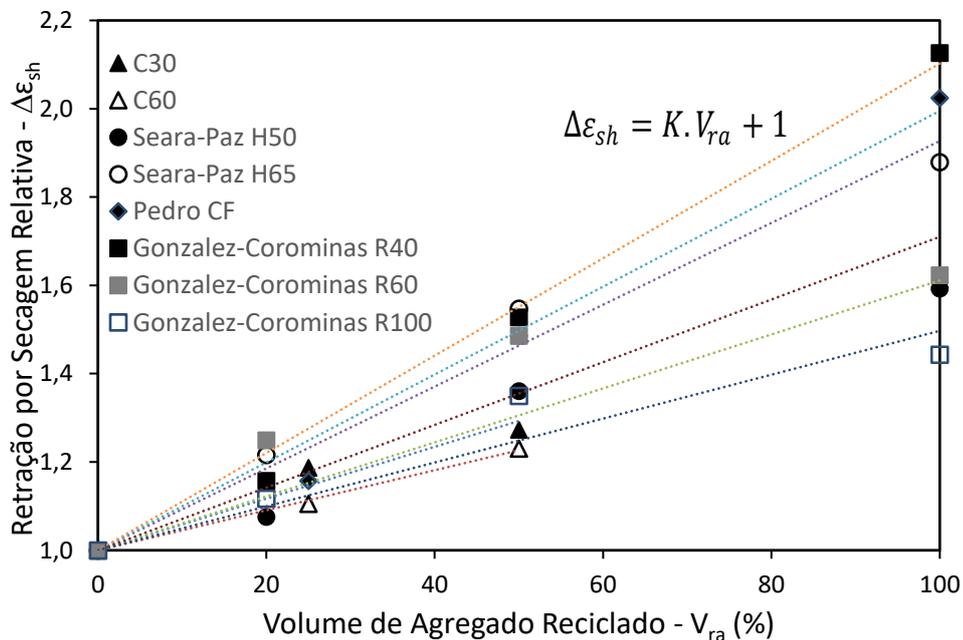


FONTE: Autora (2022).

#### 4.2.4 Influência do Agregado Reciclado na Retração

O efeito do teor de agregado reciclado sobre a retração relativa do concreto ( $\Delta\varepsilon_{sh} = \frac{\varepsilon_{sh}^{\text{concreto reciclado}}}{\varepsilon_{sh}^{\text{concreto convencional}}}$ ) é apresentado na Figura 64. Os concretos analisados foram os C30 e C60 e aqueles com agregados reciclados miúdos (Tabela 35) que foram comparados com os concretos produzidos com agregado reciclado graúdo (GONZALEZ-COROMINA E ETXEBERRIA, 2016; SEARA-PAZ *et al.*, 2016) e com concreto contendo agregados reciclados miúdos e graúdos (Pedro *et al.*, 2017).

Figura 64 – Influência do teor de agregado reciclado sobre a retração relativa do concreto (t = 90 dias).



FONTE: Autora (2022).

É possível verificar que existe uma correlação linear entre a retração relativa ( $\Delta\varepsilon_{sh}$ ) e teor de agregado ( $V_{ra}$ ) para todos os concretos. A influência do teor de agregado reciclado sobre a retração pode ser medida pelo coeficiente  $K$  conforme Figura 64. O valor  $K$  variou entre 0,0045 e 0,0110, e o coeficiente de regressão linear  $R^2$  variou de 0,90 a 1,00.

Quanto maior o valor  $K$ , maior é o efeito do agregado reciclado sobre a retração por secagem. Verifica-se, portanto, que o concreto com agregado miúdo reciclado apresenta uma deformação menor para o mesmo teor de substituição do que o concreto produzido com agregado graúdo reciclado. Esse fenômeno pode estar associado ao método de projeto de mistura utilizado por Andrade (2018), no qual o efeito

nocivo do agregado reciclado miúdo sobre a resistência e o módulo de elasticidade do concreto foi reduzido, apesar do aumento da capacidade de absorção de água de concreto. Esse resultado corrobora a hipótese apresentada por Silva e Brito (2015) de que é possível reduzir a deformação do concreto com agregado reciclado modificando o processo de mistura ou melhorando o método de projeto da mistura.

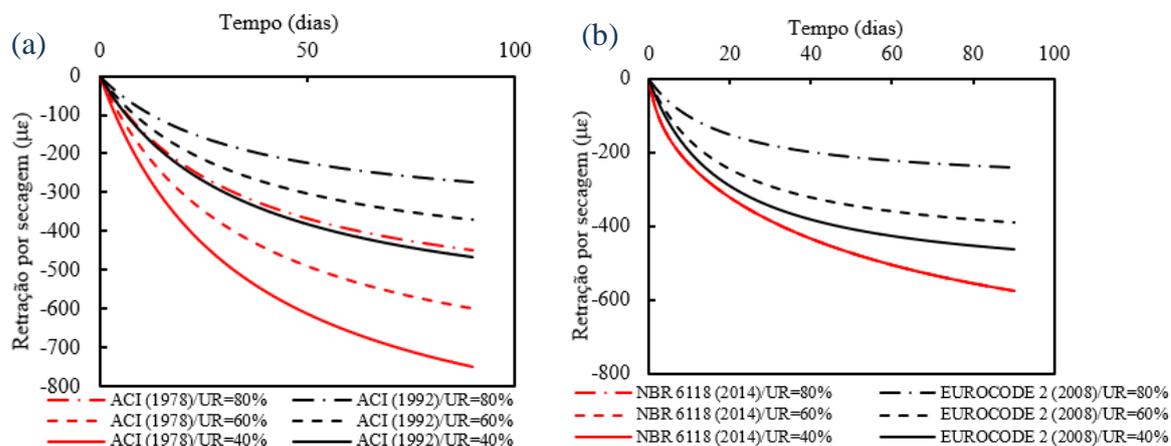
### 4.3 MODELAGEM TEÓRICA DA RETRAÇÃO

#### 4.3.1 Estudo Paramétrico

##### 4.3.1.1 Parâmetros de Projeto

A umidade relativa é um parâmetro presente em todos os modelos analisados. A Figura 65 mostra que ao variar o modelo, a curva teórica varia mesmo com UR (umidade relativa) igual, e ao variar a umidade relativa a curva também muda. No entanto, a magnitude dessa mudança varia de acordo com o modelo, como pode ser visto na Tabela 48, nos valores de retração aos 90 dias de todos os modelos analisados, bem como a variação (%) em relação a UR.

Figura 65 - Retração ao longo do tempo para os modelos: (a)ACI e (b)NBR 6118 e Eurodode 2.



FONTE: Autora (2022).

Os valores de retração são maiores quando reduz a umidade relativa e menores quando a UR é aumentada (Figura 65). Este resultado é esperado e coerente com o fenômeno de retração, pois segundo Al- Saleh (2014), a principal causa dessa deformação é a perda de água durante o processo de secagem do concreto. Umidades relativas maiores, ocorre menor perda de água para o ambiente, consequentemente, menores deformações.

Na NBR 6118 (2014) conforme as curvas geradas (Figura 65, b) e o valores de retração aos 90 dias (Figura 66, a), a umidade relativa não teve influência significativa na retração, o mesmo ocorre no Modelo II (1978) exposto na Figura 66 (c). Nos outros modelos analisados a umidade relativa apresenta valores significativos (acima de 20%), sendo no Eurocode 2 (2008), Modelo B4 (2015), CEB-FIP (1990), CEB-FIB (2010), Gardner (2004), ACI (1978) e ACI (1992), a umidade relativa é o parâmetro de maior influência conforme Tabela 47.

A análise da resistência à compressão foi realizada apenas naqueles modelos que não possuem parâmetros de mistura, conforme Figura 66 (b), (f), (g) e (h), com exceção do Modelo B4 (2015) (Figura 66, e). Verificou-se no Modelo B4 (2015) ao modificar apenas a resistência, que a mesma não tem influência no valor da deformação. A retração deste modelo só varia com os parâmetros da mistura. Conforme Tabela 48, verifica-se que a resistência à compressão aos 28 dias não apresenta valores significativos no modelo B4 (2015). No entanto, no restante dos modelos apresenta influencia significativa.

Rahal (2007) afirma que além da resistência do concreto, é importante conhecer o módulo de elasticidade para que o mesmo seja utilizado com confiança nos elementos estruturais. O módulo de elasticidade tem influência significativa na retração, sendo uma propriedade que deve ser considerada para estimar a retração do concreto (SILVA *et al.*, 2015a). Apenas os modelos B3 (1995) e B4 (2015) consideram esse parâmetro (Figura 66, d, e). No entanto, o módulo de elasticidade não tem influência na retração obtida por esses modelos, pois a deformação manteve-se constante variando-se o módulo de elasticidade.

#### 4.3.1.2 Parâmetros da Mistura

Verifica-se nos modelos que quanto maior a relação água/cimento maior a retração por secagem (Tabela 49). Resultado coerente com o esperado, visto que, mantendo-se todos os fatores iguais, a retração por secagem aumenta quando a relação água/cimento aumenta (GILBERT; RANZI, 2011). No entanto, de acordo com TAM *et al.* (2015), as relações água/cimento são inconclusivas para a previsão da retração por secagem.

A magnitude da deformação varia para os concretos de 30MPa e 60MPa e de modelo para modelo. No Modelo II (1978) e Modelo B4 (2015), Figura 66 (c) e (e), a relação água/cimento dos concretos de 60MPa tem influencia significativa. O mesmo não ocorre nos concretos de 30 MPa do Modelo II (1978) em que a relação a/c

apresenta variação de 2,51% e no Modelo B4 (2015) é 22,8%, como mostrado na Figura 66 (c) e (e), respectivamente.

Comportamento semelhante é observado ao analisar a relação agregado total/cimento (t/c), em que a relação t/c apresenta variação de 2,94% no Modelo II (1978) não tendo influência significativa e 23% no Modelo B4 (2015). Observa-se que a relação agregado miúdo/cimento também não tem influência significativa no Modelo II (1978) (Figura 66, c). Na Tabela 49, verifica-se que quanto maior a relação agregado total/cimento menor a retração, resultado esperado, visto que o agregado contribui na estabilidade dimensional do concreto (LV et al., 2019).

Na Tabela 49, verifica-se que quanto maior o teor agregado miúdo/agregado total, maior a retração. A retração por secagem é maior nos concretos com teores maiores de agregado miúdo, possivelmente, devido à presença de partículas mais finas e restrição mais baixa (LOTFY; AL-FAYEZ, 2015). No entanto, os modelos ACI (1978) e ACI (1992) apresentam variação da retração inferior a 20% para a relação agregado miúdo/agregado total, conforme exposto nas Figuras 3 (i) e (j), respectivamente.

No Modelo II (1978) a relação agregado graúdo/agregado miúdo menor que um e agregado miúdo/cimento não são considerados parâmetros relevantes, conforme Figura 66 (c). Entretanto, a relação agregado graúdo/miúdo maior que um é o parâmetro de maior influência comparado aos outros, conforme Tabela 47 e Figura 66 (c). Esse resultado indica para esse modelo que o teor de agregado graúdo comparado ao miúdo possui maior influência nos valores de retração. No Modelo B3 (1995) o teor de água apresenta valores superiores a 20% (Figura 66, d), tendo influência significativa nos resultado da retração.

Na Tabela 49, verifica-se que quanto maior o teor de cimento, maior a retração. Segundo Wu *et al.* (2017) o cimento está entre os fatores que afetam a retração, quanto maior o teor de cimento maior porosidade do concreto e maior a retração. No entanto, o teor de cimento ( $\text{kg/m}^3$ ) não apresentou influência significativa conforme mostrado nas Figuras 66 (e), (i) e (j), respectivamente, para os Modelos B4 (2015), ACI (1978) e ACI (1992).

#### 4.3.1.3 Parâmetros dos Materiais

O tipo de cimento apresenta influencia para a maioria dos modelos que considera esse parâmetro, com exceção de Gardner (2004) e ACI (1978). Wu *et al.* (2017) afirmam que tipo e finura do cimento influenciam na retração. No entanto, não é possível fazer uma correlação direta entre o tipo de cimento e os valores da retração obtidos com os modelos numéricos. Conforme Tabela 50, o tipo de cimento não segue uma tendência com relação ao valores, pois para o mesmo tipo de cimento alguns modelos apresentam valores superiores e outros inferiores de retração, devido ao fato de cada modelo possuir valores de constantes pré-estabelecidos para cada tipo de cimento.

Apenas no Modelo B4 (2015), o tipo de agregado e o uso de aditivos e adições são considerados. No entanto, os resultados obtidos foram incoerentes e seus resultados não foram apresentados.

#### 4.3.1.4 Parâmetros Geométricos

Na Tabela 51 observa-se que quanto maior a relação V/S menor a retração, pois menor será a área de exposição do elemento ao ambiente, reduzindo assim a deformação por retração por secagem. O mesmo ocorre com as formas, na qual quanto menor a área de exposição menor a retração, sendo a laje a forma com maior superfície de exposição e conseqüentemente, maior retração. A espessura também tem influência na retração, quanto maior a espessura menor a retração, pois maior dificuldade de perda de água para o ambiente. Os modelos que apresentam esses parâmetros possuem comportamento esperado para a retração.

No entanto, nos modelos ACI (1978) e Modelo II (1978) a forma não possui influencia significativa nos valores de retração, conforme Figura 66 (i) e Figura 66 (c), respectivamente. Já o Modelo B3 (1995) e Modelo B4 (2015) a forma são parâmetros de influência, sendo no Modelo B3 (2015) o parâmetro de maior influência (Tabela 47).

A relação V/S não tem influência significativa no modelo ACI (1978), conforme Figura 66 (i), mas nos Modelos II (1978) e Modelo B4 (2015) apresenta influência, como observado na Figura 66 (c) e (e), respectivamente. A espessura fictícia apresenta valores significativos em todos os modelos, sendo na NBR 6118 (2014) o parâmetro de maior influência é a espessura fictícia (Tabela 47).

#### 4.3.1.5 Parâmetros de Cura

O tipo de cura tem influencia significativa apenas para o Modelo B3 (1995), Figura 66 (d) e não apresenta relevância significativa em nenhum dos modelos da ACI que apresentam esse parâmetro (Figura 66, i, j). O período de cura tem influencia nos valores de retração nos modelos ACI (1978) e ACI (1992), conforme Figura 66 (i) e (j), respectivamente. Na Tabela 52, observa-se que quanto maior o tempo de cura menor a retração, comportamento esperado visto que existe maior perda de água, e conseqüentemente, maior retração nas idades iniciais do concreto.

#### 4.3.1.6 Parâmetros do Concreto

A massa específica do concreto é considerada apenas no modelo B4 (2015), no entanto, não é um parâmetro de influencia conforme Figura 66 (e).

O abatimento (slump) apresentam valores significativos para o modelo da NBR 6118 (2014), o que não ocorre para os modelos da ACI (Figura 66, i, j). Observa-se na Tabela 53 que quanto maior o slump, maior a retração por secagem, resultado esperado em misturas que apresentam maior relação água/cimento, ou seja, maior retração. No entanto, as relações água/cimento não são indicadas para prever o comportamento a da retração por secagem (TAM *et al.*,2015), e conseqüentemente, sua relação com a consistência do concreto (slump), pois é possível obter slump maiores mantendo a mesma relação água/cimento e utilizando aditivos redutores de água.

Os modelos da ACI consideram o teor de ar (%) mas os mesmos não possuem valores consideráveis (Figura 66, i, j). Observa-se na Tabela 53, que o teor de ar não segue uma tendência com relação ao valores de retração, mantendo-se constante para ACI (1992) e aumentando no ACI (1978), isto ocorre devido ao fato de cada modelo possuir valores pré-estabelecidos para considerar o teor de ar.

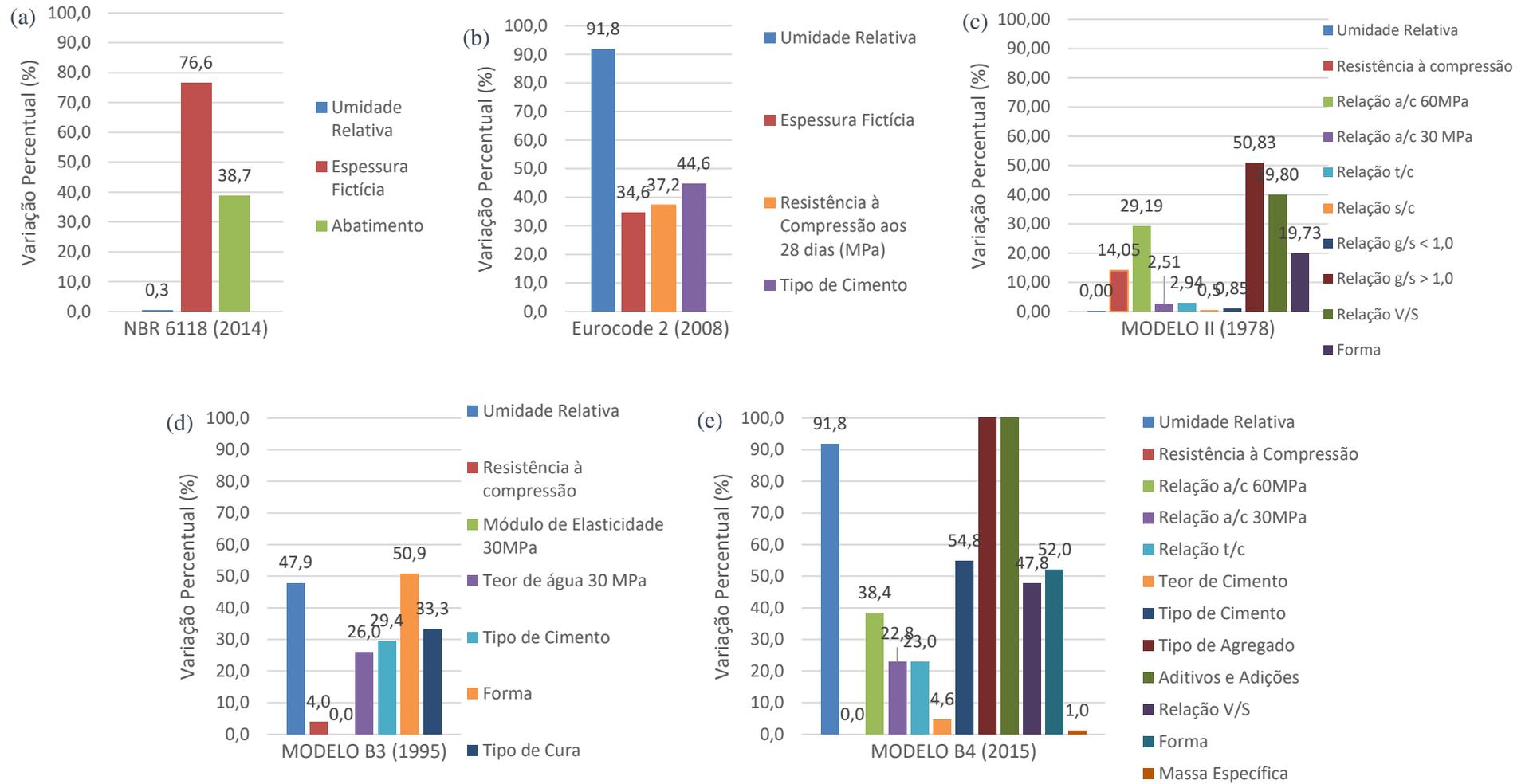
Tabela 47 – Parâmetro de maior influência nos modelos estudados.

<b>Modelos</b>	<b>Varição %</b>	<b>Parâmetro de maior influência</b>
NBR 6118 (2014)	76,6	Espessura Fictícia
EUROCODE 2 (2008)	91,8	Umidade Relativa
MODELO II (1978)	50,8	Agregado graúdo/miúdo > 1
MODELO B3 (1995)	50,9	Forma
MODELO B4 (2015)	91,8	Umidade Relativa
CEB-FIP (1990)	91,8	Umidade Relativa

<b>Modelos</b>	<b>Variação %</b>	<b>Parâmetro de maior influência</b>
CEB-FIB (2010)	91,8	Umidade Relativa
GARDNER (2004)	87,7	Umidade Relativa
ACI (1978)	66,7	Umidade Relativa
ACI (1992)	69,9	Umidade Relativa

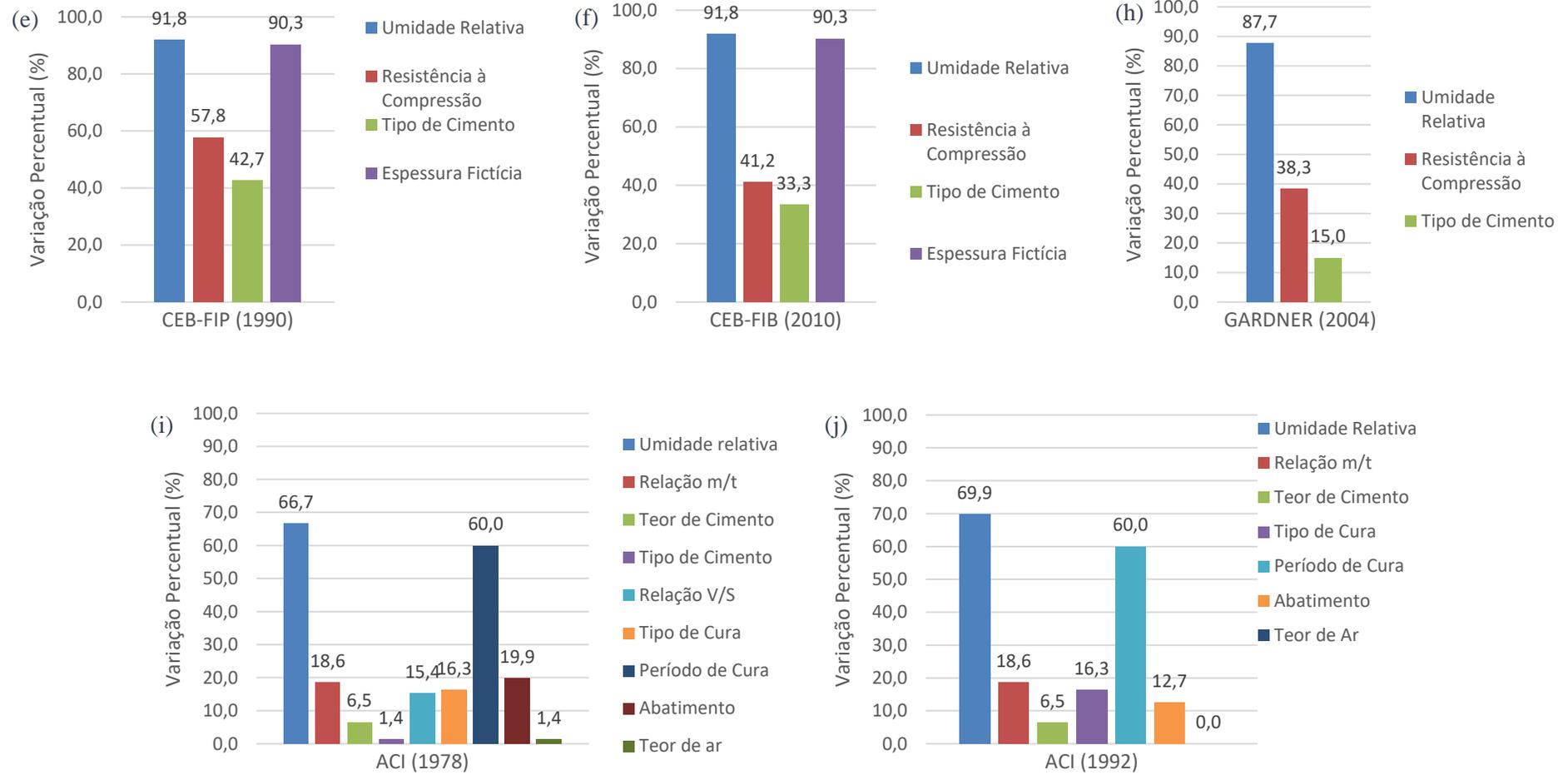
FONTE: Autora (2022).

Figura 66 – Variação (%) dos valores de retração obtidos aos 90 dias de cada modelo.



FONTE: Autora (2022).

Figura 66 – Variação (%) dos valores de retração obtidos aos 90 dias de cada modelo.



FONTE: Autora (2022).

Tabela 48 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros de projeto.

Parâmetros	Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ )	Variação Percentual (%)																																																																													
Umidade Relativa	<p>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>)</p> <p>UR=40% UR=60% UR=80%</p> <table border="1"> <caption>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>) - Umidade Relativa</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>UR=40%</th> <th>UR=60%</th> <th>UR=80%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>NBR 6118 (2014)</td><td>550</td><td>550</td><td>550</td></tr> <tr><td>ACI (1978)</td><td>750</td><td>600</td><td>450</td></tr> <tr><td>ACI (1992)</td><td>450</td><td>350</td><td>250</td></tr> <tr><td>CEB FIP (1990)</td><td>350</td><td>300</td><td>200</td></tr> <tr><td>CEB FIB (2010)</td><td>400</td><td>350</td><td>200</td></tr> <tr><td>GARDNER (2004)</td><td>250</td><td>200</td><td>150</td></tr> <tr><td>MODELO II (1978)</td><td>550</td><td>550</td><td>550</td></tr> <tr><td>MODELO B3 (1995)</td><td>250</td><td>200</td><td>150</td></tr> <tr><td>MODELO B4 (2015)</td><td>150</td><td>150</td><td>100</td></tr> <tr><td>EUROCODE 2...</td><td>450</td><td>400</td><td>250</td></tr> </tbody> </table>	Modelo	UR=40%	UR=60%	UR=80%	NBR 6118 (2014)	550	550	550	ACI (1978)	750	600	450	ACI (1992)	450	350	250	CEB FIP (1990)	350	300	200	CEB FIB (2010)	400	350	200	GARDNER (2004)	250	200	150	MODELO II (1978)	550	550	550	MODELO B3 (1995)	250	200	150	MODELO B4 (2015)	150	150	100	EUROCODE 2...	450	400	250	<p>Variação Percentual(%)</p> <p>UR=40% UR=80%</p> <table border="1"> <caption>Variação Percentual (%) - Umidade Relativa</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>UR=40%</th> <th>UR=80%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>NBR 6118 (2014)</td><td>25</td><td>-25</td></tr> <tr><td>ACI (1978)</td><td>25</td><td>-25</td></tr> <tr><td>ACI (1992)</td><td>20</td><td>-35</td></tr> <tr><td>CEB FIP (1990)</td><td>20</td><td>-35</td></tr> <tr><td>CEB FIB (2010)</td><td>20</td><td>-35</td></tr> <tr><td>GARDNER (2004)</td><td>15</td><td>-35</td></tr> <tr><td>MODELO II (1978)</td><td>20</td><td>-35</td></tr> <tr><td>MODELO B3 (1995)</td><td>20</td><td>-35</td></tr> <tr><td>MODELO B4 (2015)</td><td>20</td><td>-35</td></tr> <tr><td>EUROCODE 2 (2008)</td><td>20</td><td>-35</td></tr> </tbody> </table>	Modelo	UR=40%	UR=80%	NBR 6118 (2014)	25	-25	ACI (1978)	25	-25	ACI (1992)	20	-35	CEB FIP (1990)	20	-35	CEB FIB (2010)	20	-35	GARDNER (2004)	15	-35	MODELO II (1978)	20	-35	MODELO B3 (1995)	20	-35	MODELO B4 (2015)	20	-35	EUROCODE 2 (2008)	20	-35
Modelo	UR=40%	UR=60%	UR=80%																																																																												
NBR 6118 (2014)	550	550	550																																																																												
ACI (1978)	750	600	450																																																																												
ACI (1992)	450	350	250																																																																												
CEB FIP (1990)	350	300	200																																																																												
CEB FIB (2010)	400	350	200																																																																												
GARDNER (2004)	250	200	150																																																																												
MODELO II (1978)	550	550	550																																																																												
MODELO B3 (1995)	250	200	150																																																																												
MODELO B4 (2015)	150	150	100																																																																												
EUROCODE 2...	450	400	250																																																																												
Modelo	UR=40%	UR=80%																																																																													
NBR 6118 (2014)	25	-25																																																																													
ACI (1978)	25	-25																																																																													
ACI (1992)	20	-35																																																																													
CEB FIP (1990)	20	-35																																																																													
CEB FIB (2010)	20	-35																																																																													
GARDNER (2004)	15	-35																																																																													
MODELO II (1978)	20	-35																																																																													
MODELO B3 (1995)	20	-35																																																																													
MODELO B4 (2015)	20	-35																																																																													
EUROCODE 2 (2008)	20	-35																																																																													
Resistência à Compressão	<p>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>)</p> <p>f28 = 30 MPa f28 = 60 MPa</p> <table border="1"> <caption>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>) - Resistência à Compressão</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>f28 = 30 MPa</th> <th>f28 = 60 MPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CEB FIP (1990)</td><td>500</td><td>350</td></tr> <tr><td>CEB FIB (2010)</td><td>480</td><td>350</td></tr> <tr><td>GARDNER (2004)</td><td>300</td><td>200</td></tr> <tr><td>EUROCODE 2 (2008)</td><td>550</td><td>400</td></tr> <tr><td>MODELO B4 (2015)*</td><td>100</td><td>100</td></tr> </tbody> </table>	Modelo	f28 = 30 MPa	f28 = 60 MPa	CEB FIP (1990)	500	350	CEB FIB (2010)	480	350	GARDNER (2004)	300	200	EUROCODE 2 (2008)	550	400	MODELO B4 (2015)*	100	100	<p>Variação Percentual %</p> <p>f28 = 30 MPa</p> <table border="1"> <caption>Variação Percentual (%) - Resistência à Compressão</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>f28 = 30 MPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>CEB FIP (1990)</td><td>-35</td></tr> <tr><td>CEB FIB (2010)</td><td>-30</td></tr> <tr><td>GARDNER (2004)</td><td>-25</td></tr> <tr><td>EUROCODE 2 (2008)</td><td>-25</td></tr> </tbody> </table>	Modelo	f28 = 30 MPa	CEB FIP (1990)	-35	CEB FIB (2010)	-30	GARDNER (2004)	-25	EUROCODE 2 (2008)	-25																																																	
Modelo	f28 = 30 MPa	f28 = 60 MPa																																																																													
CEB FIP (1990)	500	350																																																																													
CEB FIB (2010)	480	350																																																																													
GARDNER (2004)	300	200																																																																													
EUROCODE 2 (2008)	550	400																																																																													
MODELO B4 (2015)*	100	100																																																																													
Modelo	f28 = 30 MPa																																																																														
CEB FIP (1990)	-35																																																																														
CEB FIB (2010)	-30																																																																														
GARDNER (2004)	-25																																																																														
EUROCODE 2 (2008)	-25																																																																														
Módulo de Elasticidade	Manteve-se constante variando o módulo de elasticidade.	Não teve variação.																																																																													

FONTE: Autora (2022).

Tabela 49 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros da mistura.

Parâmetros	Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ )	Variação Percentual (%)
Relação água/ cimento $f_{28} = 30 \text{ MPa}$	<p>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>)</p> <p>MODELO II (1978) MODELO B4 (2015)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>a/c=0,50</math></li> <li><math>a/c=0,55</math></li> <li><math>a/c=0,60</math></li> </ul>	<p>Variação percentual (%) <math>a/c=0,55</math></p> <p>MODELO II (1978) MODELO B4 (2015)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>a/c=0,50</math></li> <li><math>a/c=0,60</math></li> </ul>
Relação água/ cimento $f_{28} = 60 \text{ MPa}$	<p>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>)</p> <p>MODELO II (1978) MODELO B4 (2015)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>a/c=0,30</math></li> <li><math>a/c=0,35</math></li> <li><math>a/c=0,40</math></li> </ul>	<p>Variação percentual (%) <math>a/c=0,35</math></p> <p>MODELO II (1978) MODELO B4 (2015)</p> <p>Resistência 60MPa - <math>a/c=0,35</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>a/c=0,30</math></li> <li><math>a/c=0,40</math></li> </ul>

FONTE: Autora (2022).

Tabela 49 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros da mistura.

Parâmetros	Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ )	Variação Percentual (%)																					
Relação agregado total/cimento	<table border="1"> <caption>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>) - Relação agregado total/cimento</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>t/c=4,00</th> <th>t/c=5,00</th> <th>t/c=6,00</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MODELO II (1978)</td> <td>~650</td> <td>~650</td> <td>~630</td> </tr> <tr> <td>MODELO B4 (2015)</td> <td>~150</td> <td>~130</td> <td>~110</td> </tr> </tbody> </table>	Modelo	t/c=4,00	t/c=5,00	t/c=6,00	MODELO II (1978)	~650	~650	~630	MODELO B4 (2015)	~150	~130	~110	<table border="1"> <caption>Variação Percentual (%) - Relação agregado total/cimento</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>t/c=4,00</th> <th>t/c=6,00</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MODELO II</td> <td>~0</td> <td>~-2</td> </tr> <tr> <td>MODELO B4</td> <td>~15</td> <td>~-11</td> </tr> </tbody> </table>	Modelo	t/c=4,00	t/c=6,00	MODELO II	~0	~-2	MODELO B4	~15	~-11
Modelo	t/c=4,00	t/c=5,00	t/c=6,00																				
MODELO II (1978)	~650	~650	~630																				
MODELO B4 (2015)	~150	~130	~110																				
Modelo	t/c=4,00	t/c=6,00																					
MODELO II	~0	~-2																					
MODELO B4	~15	~-11																					
Relação agregado miúdo/agregado total	<table border="1"> <caption>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>) - Relação agregado miúdo/agregado total</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>m/t=0,40</th> <th>m/t=0,50</th> <th>m/t=0,60</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACI (1978)</td> <td>~330</td> <td>~390</td> <td>~400</td> </tr> <tr> <td>ACI (1992)</td> <td>~230</td> <td>~260</td> <td>~270</td> </tr> </tbody> </table>	Modelo	m/t=0,40	m/t=0,50	m/t=0,60	ACI (1978)	~330	~390	~400	ACI (1992)	~230	~260	~270	<table border="1"> <caption>Variação Percentual (%) - Relação agregado miúdo/agregado total</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>m/t = 0,40</th> <th>m/t = 0,60</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACI (1978)</td> <td>~-14</td> <td>~2</td> </tr> <tr> <td>ACI (1992)</td> <td>~-14</td> <td>~2</td> </tr> </tbody> </table>	Modelo	m/t = 0,40	m/t = 0,60	ACI (1978)	~-14	~2	ACI (1992)	~-14	~2
Modelo	m/t=0,40	m/t=0,50	m/t=0,60																				
ACI (1978)	~330	~390	~400																				
ACI (1992)	~230	~260	~270																				
Modelo	m/t = 0,40	m/t = 0,60																					
ACI (1978)	~-14	~2																					
ACI (1992)	~-14	~2																					

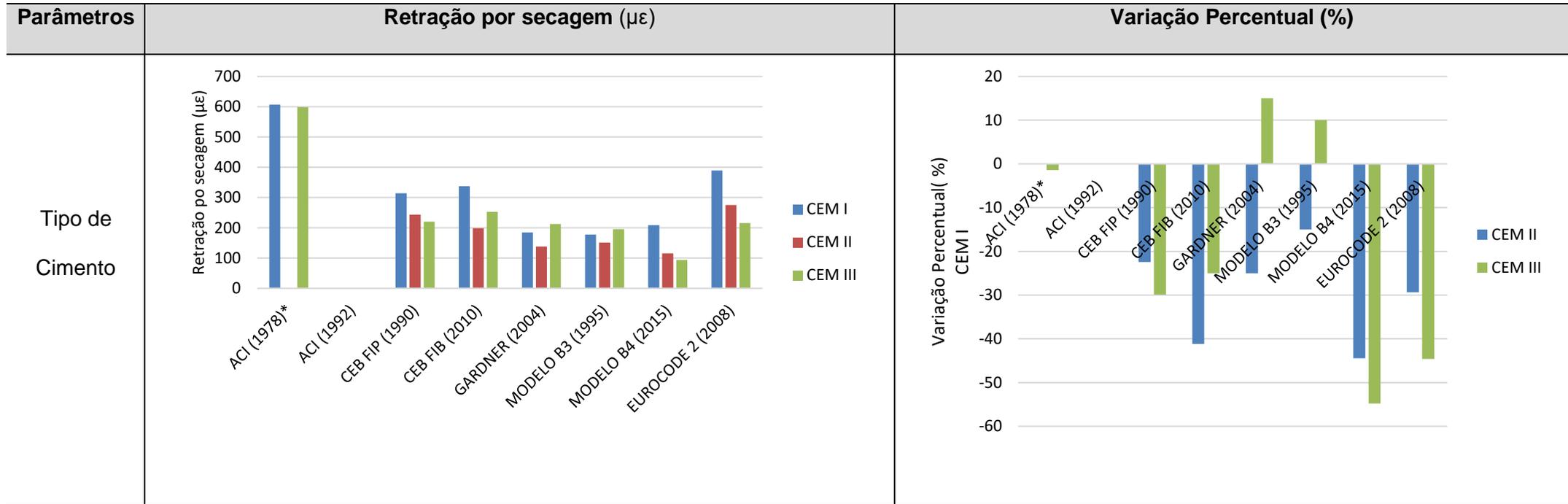
FONTE: Autora (2022).

Tabela 49– Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros da mistura.

Parâmetros	Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ )	Variação Percentual (%)																																
Teor de cimento ( $\text{kg/m}^3$ )	<p>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>)</p> <table border="1"> <caption>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>)</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>cim = 300</th> <th>cim = 350</th> <th>cim = 400</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACI (1978)</td> <td>~390</td> <td>~400</td> <td>~410</td> </tr> <tr> <td>ACI (1992)</td> <td>~260</td> <td>~270</td> <td>~280</td> </tr> <tr> <td>MODELO B4 (2015)</td> <td>~140</td> <td>~145</td> <td>~150</td> </tr> </tbody> </table>	Modelo	cim = 300	cim = 350	cim = 400	ACI (1978)	~390	~400	~410	ACI (1992)	~260	~270	~280	MODELO B4 (2015)	~140	~145	~150	<p>Variação Percentual(%)</p> <table border="1"> <caption>Variação Percentual(%)</caption> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>cim = 300</th> <th>cim = 350</th> <th>cim = 400</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACI (1978)</td> <td>~-3.2</td> <td>~3.2</td> <td>~0.0</td> </tr> <tr> <td>ACI (1992)</td> <td>~-3.2</td> <td>~3.2</td> <td>~0.0</td> </tr> <tr> <td>MODELO B4 (2015)</td> <td>~-2.5</td> <td>~2.1</td> <td>~0.0</td> </tr> </tbody> </table>	Modelo	cim = 300	cim = 350	cim = 400	ACI (1978)	~-3.2	~3.2	~0.0	ACI (1992)	~-3.2	~3.2	~0.0	MODELO B4 (2015)	~-2.5	~2.1	~0.0
Modelo	cim = 300	cim = 350	cim = 400																															
ACI (1978)	~390	~400	~410																															
ACI (1992)	~260	~270	~280																															
MODELO B4 (2015)	~140	~145	~150																															
Modelo	cim = 300	cim = 350	cim = 400																															
ACI (1978)	~-3.2	~3.2	~0.0																															
ACI (1992)	~-3.2	~3.2	~0.0																															
MODELO B4 (2015)	~-2.5	~2.1	~0.0																															

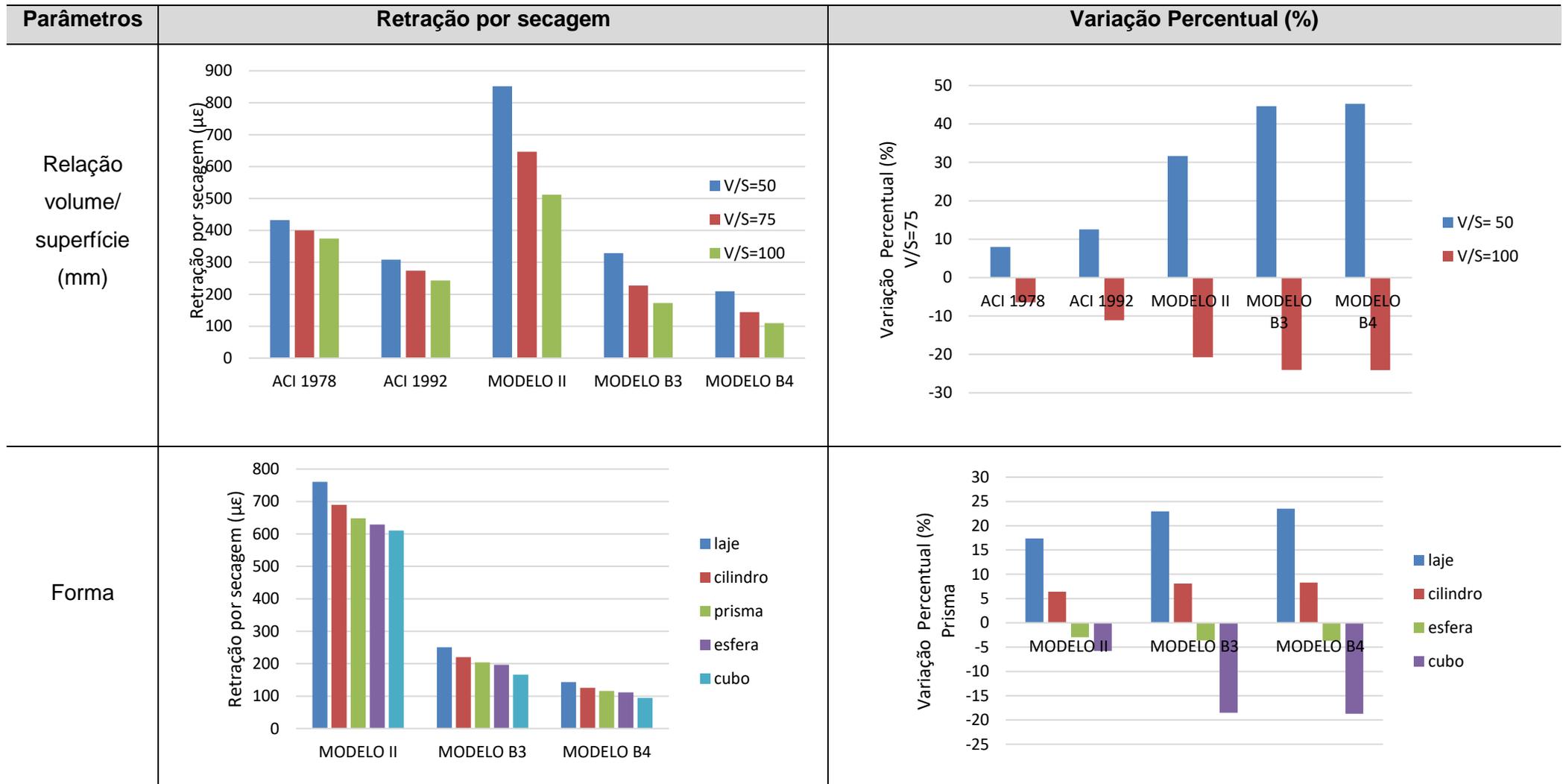
FONTE: Autora (2022).

Tabela 50 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros dos materiais.



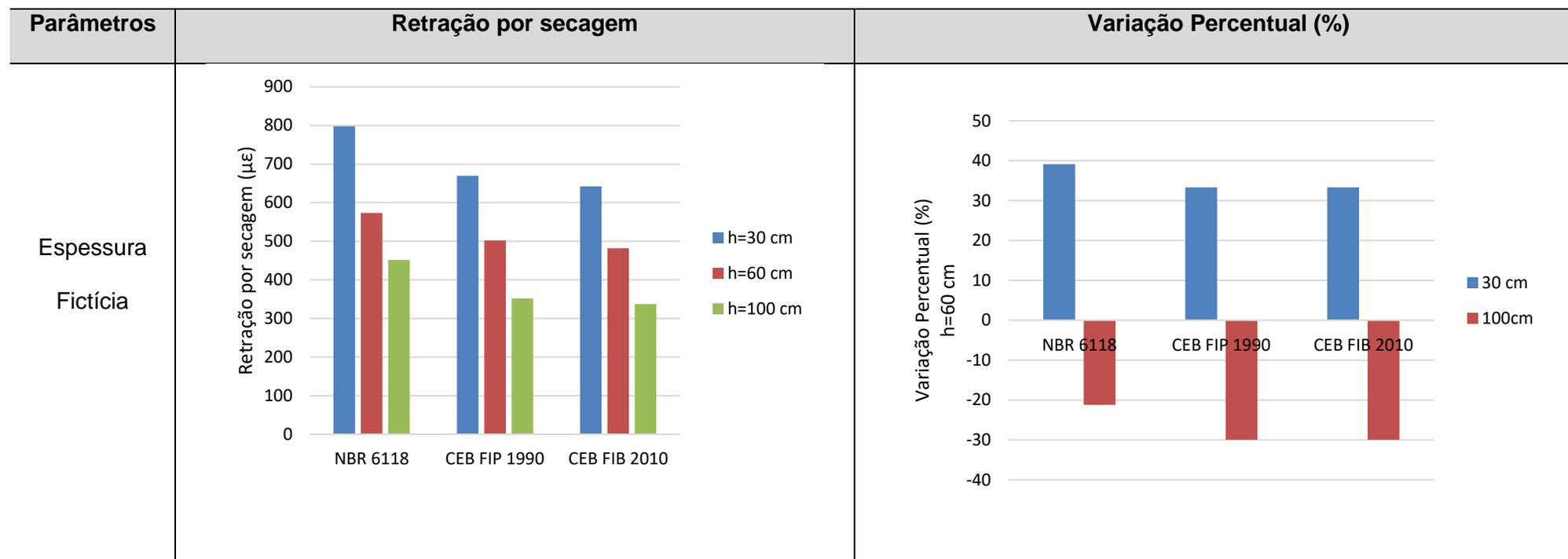
FONTE: Autora (2022).

Tabela 51 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros geométricos.



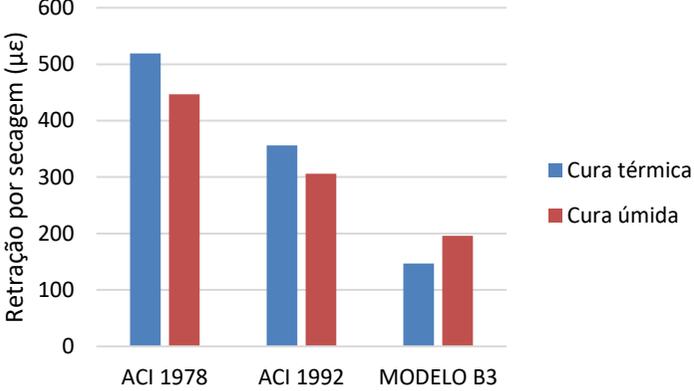
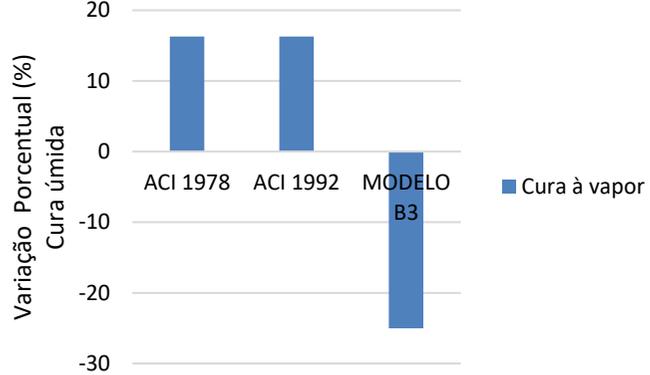
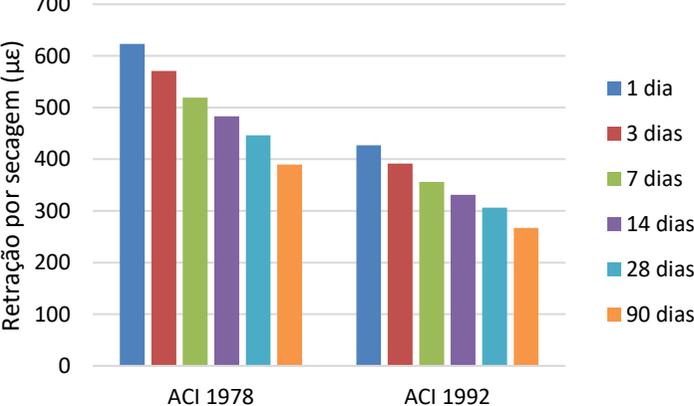
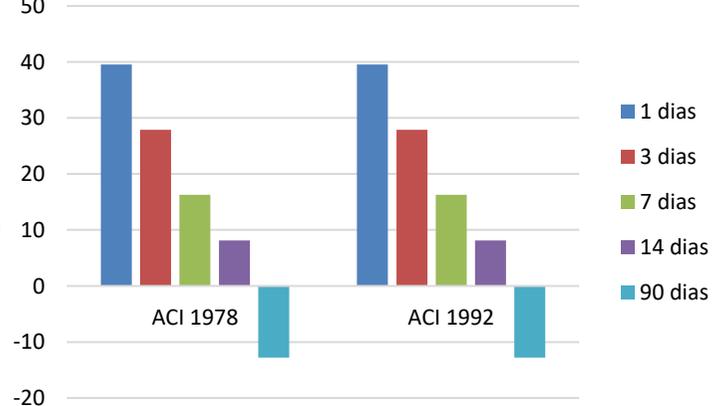
FONTE: Autora (2022).

Tabela 51 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros geométricos.



FONTE: Autora (2022).

Tabela 52 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros de cura.

Parâmetros	Retração por secagem	Variação Percentual (%)																																							
Tipo de cura	 <p>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de cura</th> <th>ACI 1978</th> <th>ACI 1992</th> <th>MODELO B3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cura térmica</td> <td>~520</td> <td>~360</td> <td>~150</td> </tr> <tr> <td>Cura úmida</td> <td>~450</td> <td>~310</td> <td>~200</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de cura	ACI 1978	ACI 1992	MODELO B3	Cura térmica	~520	~360	~150	Cura úmida	~450	~310	~200	 <p>Variação Percentual (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de cura</th> <th>ACI 1978</th> <th>ACI 1992</th> <th>MODELO B3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cura úmida</td> <td>~16%</td> <td>~16%</td> <td>~-25%</td> </tr> <tr> <td>Cura à vapor</td> <td>0%</td> <td>0%</td> <td>0%</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de cura	ACI 1978	ACI 1992	MODELO B3	Cura úmida	~16%	~16%	~-25%	Cura à vapor	0%	0%	0%															
Tipo de cura	ACI 1978	ACI 1992	MODELO B3																																						
Cura térmica	~520	~360	~150																																						
Cura úmida	~450	~310	~200																																						
Tipo de cura	ACI 1978	ACI 1992	MODELO B3																																						
Cura úmida	~16%	~16%	~-25%																																						
Cura à vapor	0%	0%	0%																																						
Período de cura	 <p>Retração por secagem (<math>\mu\epsilon</math>)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Período de cura</th> <th>ACI 1978</th> <th>ACI 1992</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 dia</td> <td>~630</td> <td>~430</td> </tr> <tr> <td>3 dias</td> <td>~580</td> <td>~390</td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>~520</td> <td>~360</td> </tr> <tr> <td>14 dias</td> <td>~490</td> <td>~330</td> </tr> <tr> <td>28 dias</td> <td>~450</td> <td>~310</td> </tr> <tr> <td>90 dias</td> <td>~390</td> <td>~270</td> </tr> </tbody> </table>	Período de cura	ACI 1978	ACI 1992	1 dia	~630	~430	3 dias	~580	~390	7 dias	~520	~360	14 dias	~490	~330	28 dias	~450	~310	90 dias	~390	~270	 <p>Variação Percentual (%)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Período de cura</th> <th>ACI 1978</th> <th>ACI 1992</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 dias</td> <td>~40%</td> <td>~40%</td> </tr> <tr> <td>3 dias</td> <td>~28%</td> <td>~28%</td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>~16%</td> <td>~16%</td> </tr> <tr> <td>14 dias</td> <td>~8%</td> <td>~8%</td> </tr> <tr> <td>90 dias</td> <td>~-12%</td> <td>~-12%</td> </tr> </tbody> </table>	Período de cura	ACI 1978	ACI 1992	1 dias	~40%	~40%	3 dias	~28%	~28%	7 dias	~16%	~16%	14 dias	~8%	~8%	90 dias	~-12%	~-12%
Período de cura	ACI 1978	ACI 1992																																							
1 dia	~630	~430																																							
3 dias	~580	~390																																							
7 dias	~520	~360																																							
14 dias	~490	~330																																							
28 dias	~450	~310																																							
90 dias	~390	~270																																							
Período de cura	ACI 1978	ACI 1992																																							
1 dias	~40%	~40%																																							
3 dias	~28%	~28%																																							
7 dias	~16%	~16%																																							
14 dias	~8%	~8%																																							
90 dias	~-12%	~-12%																																							

FONTE: Autora (2022).

Tabela 53 – Retração por secagem ( $\mu\epsilon$ ) e variação percentual (%) dos parâmetros do concreto.

Parâmetros	Retração por secagem	Variação Percentual (%)																												
Abatimento (mm)	<p>Bar chart showing shrinkage by drying (<math>\mu\epsilon</math>) for three standards: NBR 6118, ACI 1978, and ACI 1992. The y-axis represents shrinkage by drying (<math>\mu\epsilon</math>) from 0 to 600. The x-axis lists the standards. For each standard, three bars represent different slump values: 40mm (blue), 80mm (red), and 115mm (green).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Standard</th> <th>slump=40mm</th> <th>slump=80mm</th> <th>slump=115mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NBR 6118</td> <td>~270</td> <td>~360</td> <td>~440</td> </tr> <tr> <td>ACI 1978</td> <td>~450</td> <td>~500</td> <td>~540</td> </tr> <tr> <td>ACI 1992</td> <td>~290</td> <td>~310</td> <td>~330</td> </tr> </tbody> </table>	Standard	slump=40mm	slump=80mm	slump=115mm	NBR 6118	~270	~360	~440	ACI 1978	~450	~500	~540	ACI 1992	~290	~310	~330	<p>Bar chart showing percentage variation for slump = 115 mm for three standards: NBR 6118, ACI 1978, and ACI 1992. The y-axis represents percentage variation from 0 to -45. For each standard, two bars represent different slump values: 80 mm (blue) and 40 mm (red).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Standard</th> <th>slump = 80 mm</th> <th>slump = 40 mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NBR 6118</td> <td>~-19%</td> <td>~-38%</td> </tr> <tr> <td>ACI 1978</td> <td>~-7%</td> <td>~-16%</td> </tr> <tr> <td>ACI 1992</td> <td>~-5%</td> <td>~-11%</td> </tr> </tbody> </table>	Standard	slump = 80 mm	slump = 40 mm	NBR 6118	~-19%	~-38%	ACI 1978	~-7%	~-16%	ACI 1992	~-5%	~-11%
Standard	slump=40mm	slump=80mm	slump=115mm																											
NBR 6118	~270	~360	~440																											
ACI 1978	~450	~500	~540																											
ACI 1992	~290	~310	~330																											
Standard	slump = 80 mm	slump = 40 mm																												
NBR 6118	~-19%	~-38%																												
ACI 1978	~-7%	~-16%																												
ACI 1992	~-5%	~-11%																												
Teor de ar%	<p>Bar chart showing shrinkage by drying (<math>\mu\epsilon</math>) for two standards: ACI 1978 and ACI 1992. The y-axis represents shrinkage by drying (<math>\mu\epsilon</math>) from 0 to 500. The x-axis lists the standards. For each standard, two bars represent different air content values: 2.3% (blue) and 4.0% (red).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Standard</th> <th>teor de ar = 2,3</th> <th>teor de ar = 4,0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACI 1978</td> <td>~440</td> <td>~450</td> </tr> <tr> <td>ACI 1992</td> <td>~300</td> <td>~300</td> </tr> </tbody> </table>	Standard	teor de ar = 2,3	teor de ar = 4,0	ACI 1978	~440	~450	ACI 1992	~300	~300	<p>Bar chart showing percentage variation for teor de ar = 4.0 for two standards: ACI 1978 and ACI 1992. The y-axis represents percentage variation from 0 to -1.6. For each standard, one bar represents the air content value: 2.3% (blue).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Standard</th> <th>teor de ar = 2,3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ACI 1978</td> <td>~-1.4%</td> </tr> <tr> <td>ACI 1992</td> <td>~-0.2%</td> </tr> </tbody> </table>	Standard	teor de ar = 2,3	ACI 1978	~-1.4%	ACI 1992	~-0.2%													
Standard	teor de ar = 2,3	teor de ar = 4,0																												
ACI 1978	~440	~450																												
ACI 1992	~300	~300																												
Standard	teor de ar = 2,3																													
ACI 1978	~-1.4%																													
ACI 1992	~-0.2%																													

FONTE: Autora (2022).

Tabela 54 – Quadro resumo dos parâmetros de influência dos modelos.

<b>Categoria</b>	<b>Parâmetros</b>		<b>NBR 6118 (2014)</b>	<b>EURO- CODE 2 (2008)</b>	<b>MODELO II (1978)</b>	<b>MODELO B3 (1995)</b>	<b>MODELO B4 (2015)</b>	<b>CEB- FIP (1990)</b>	<b>CEB- FIB (2010)</b>	<b>GAR- DNER (2004)</b>	<b>ACI (1978)</b>	<b>ACI (1992)</b>
Projeto	Umidade Relativa (%)		N	I	I	I	N	I	I	I	I	I
	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)		----	I	não anali- sado*	não anali- sado*	N	I	I	I	----	----
	Módulo de Elasticidade (MPa)		----	----	----	N	N	----	----	----	----	----
Mistura	Relação água/cimento (a/c)	30 Mpa	----	----	N	----	I	----	----	----	----	----
		60 MPa	----	----	I	----	I	----	----	----	----	----
	Relação agregado total/cimento (t/c)		----	----	N	----	I	----	----	----	----	----
	Relação agregado miúdo/cimento (m/c)		----	----	N	----	----	----	----	----	----	----
	Relação agregado graúdo/agregado miúdo(g/m)	< 1	----	----	N	----	----	----	----	----	----	----
		> 1	----	----	I	----	----	----	----	----	----	----
	Relação agregado miúdo/agregado total (m/t)		----	----	----	----	----	----	----	----	N	N
	Teor de água		----	----	----	I	----	----	----	----	----	----
	Teor de cimento (kg/m <sup>3</sup> )		----	----	----	----	N	----	----	----	N	N

<b>Categoria</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>NBR 6118 (2014)</b>	<b>EURO- CODE 2 (2008)</b>	<b>MODELO II (1978)</b>	<b>MODELO B3 (1995)</b>	<b>MODELO B4 (2015)</b>	<b>CEB- FIP (1990)</b>	<b>CEB- FIB (2010)</b>	<b>GAR- DNER (2004)</b>	<b>ACI (1978)</b>	<b>ACI (1992)</b>
Materiais	Tipo de cimento	----	I	----	I	I	I	I	N	N	----
	Tipo de Agregado	----	----	----	----	NA	----	----	----	----	----
	Aditivos e Adições	----	----	----	----	NA	----	----	----	----	----
Geométricos	Relação volume/superfície (mm)	----	----	I	----	I	----	----	----	N	----
	Forma	----	----	N	I	I	----	----	----	----	----
	Espessura fictícia	I	I	----	----	----	I	I	----	----	----
Cura	Tipo de cura	----	----	----	I	----	----	----	----	N	N
	Período de cura (dia)	----	----	----	----	----	----	----	----	N	N
Concreto	Massa Específica do concreto	----	----	----	----	N	----	----	----	----	----
	Abatimento (slump)	I	----	----	----	----	----	----	----	N	N
	Teor de ar (%)	----	----	----	----	----	----	----	----	N	N

N: não tem influência/ I: tem influência /NA: não analisado

FONTE: Autora (2022).

A Tabela 54 apresenta um quadro resumo com os modelos analisados e os parâmetros considerados em cada modelo indicando aqueles que apresentam influência nos valores obtidos da retração. Observa-se que os modelos apesar de considerar parâmetros que afetam a retração, muitos deles não tem influência nos valores de deformação obtidos numericamente.

A maioria dos parâmetros que afetam os valores obtidos com os modelos estão dentro da categoria de projeto, materiais e geométricos. A seleção de um modelo para prever o comportamento à retração de um determinado concreto depende de diversos fatores, na qual deve-se considerar principalmente, que o modelo seja acessível aos engenheiros com pouco conhecimento especializado sobre a retração do concreto (SILVA *et al.*, 2015a) e que considere parâmetros que sejam capazes de descrever o comportamento a retração do concreto ao longo do tempo. Desta forma, utilizar parâmetros associados ao projeto para prever o comportamento a retração é de fundamental importância, bem como a definição das dimensões da peça (parâmetros geométricos). Os materiais utilizados, bem como aqueles relacionados a misturas apresentam influência direta nos parâmetros de projeto, estando correlacionados a resistência e módulo de elasticidade.

A análise dos parâmetros individuais na qual cada modelo é dependente, e examinar o nível de sensibilidade de cada parâmetro, foi importante para entender o comportamento a retração dos modelos. Entretanto, é importante a comparação de modelos com dados experimentais, apesar de ser considerada complicada devido à falta de concordância na seleção de dados apropriados e nos métodos usados para fazer a correlação, tornando difícil a decisão sobre qual modelo usar para prever a retração (SILVA *et al.*, 2015a). No entanto, utilizando dados experimentais e mantendo-se a equivalência nos parâmetros, o estudo estatístico possibilitou verificar a concordância dos modelos existentes com os valores reais de retração ao longo do tempo, conforme mostrado nos itens a seguir.

### 4.3.2 Modelagem com Agregado Miúdo Reciclado

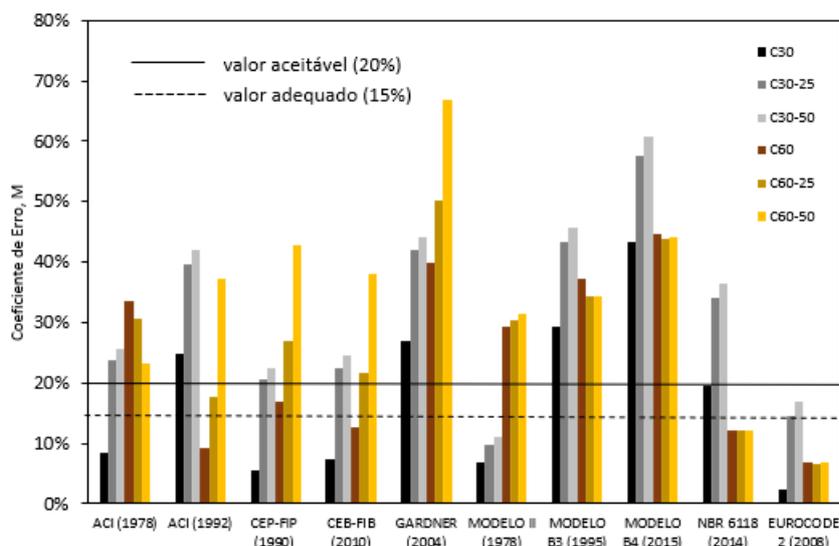
#### 4.3.2.1 Indicadores Estatísticos

Os valores do coeficiente de erro, M%, e coeficiente de desvio, D%, que medem a precisão dos modelos, são mostrados nas Figuras 67 e 68. A partir dessas considerações, os modelos CEB-FIP (1990), CEB-FIB (2010), NBR 6118 (2014) e EUROCODE 2 (2008) são aceitáveis para prever o comportamento de concretos convencionais. Enquanto o modelo ACI (1992) só pode ser usado para prever a retração no concreto C60 e o ACI (1978) no concreto C30.

O modelo Gardner (2004) e B3 (1995) apresentam um erro superior a 20% ao prever a retração para todas as misturas. O modelo B4 (2015) apresenta erro abaixo de 20% apenas para uma mistura com agregado reciclado (C30-50) e o modelo II (1978) para C30 e C30-50. São esperados resultados diferentes entre os modelos, pois, além de apresentarem diferentes equações matemáticas, não consideram os mesmos fatores no cálculo da retração.

Nos concretos com agregado reciclado miúdo, observa-se na Figura 67 que todos os modelos têm um erro superior a 15%, com exceção do modelo II (1978) apenas para C30-50, e a NBR 6118 (2014) e EUROCODE 2 (2008) que podem ser usados para prever comportamentos de concretos de alta resistência. No geral, os valores de retração por secagem previstos não podem ser considerados adequados para os concretos de resistência normal com agregado miúdo reciclado.

Figura 67 – Valores do coeficiente de erro M (%) para os modelos de previsão com C30 e C60.

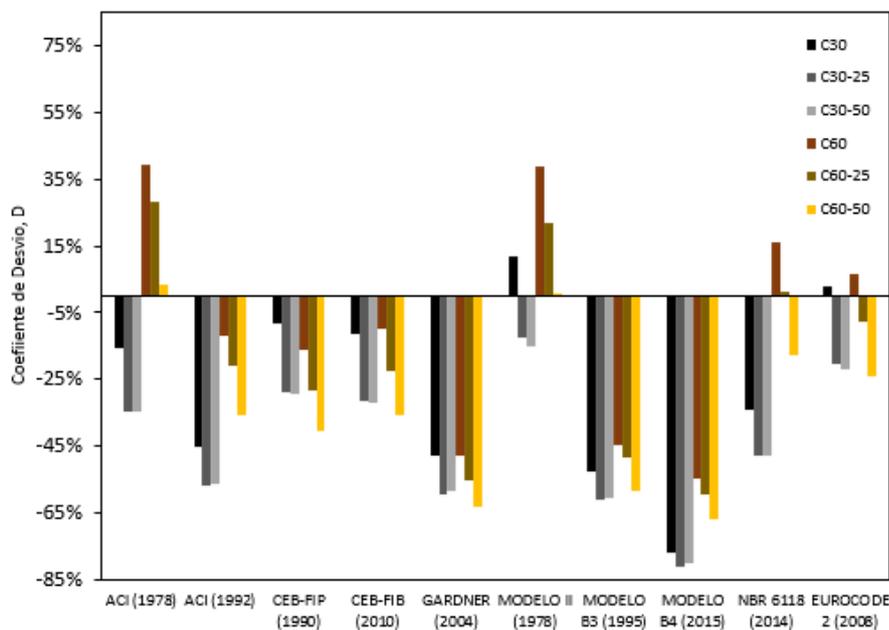


FONTE: Autora (2022).

Resultados semelhantes foram obtidos por outros pesquisadores (Silva *et al.*, 2016; Pedro *et al.*, 2017), e os erros obtidos estão associados à calibração do modelo. Apesar de sua formulação teórica, todos os modelos usam coeficientes de calibração para ajustar as funções matemáticas aos resultados experimentais esperados. Na qual, estes modelos utilizaram banco de dados experimentais composto por resultados obtidos para concretos com agregados naturais, o que explica o melhor ajuste de alguns deles para os concretos convencionais.

A Figura 68 mostra o coeficiente de desvio, D, para todos os modelos utilizados. Os valores encontrados para D indicam que a maioria dos modelos estudados subestimam os valores de retração por secagem. O modelo ACI (1978) apresentam valores superiores apenas para os concretos de alta resistência e o Eurocode 2 (2008) para os concretos convencionais.

Figura 68 – Coeficiente de desvio D (%) para os modelos de previsão com C30 e C60.



FONTE: Autora (2022).

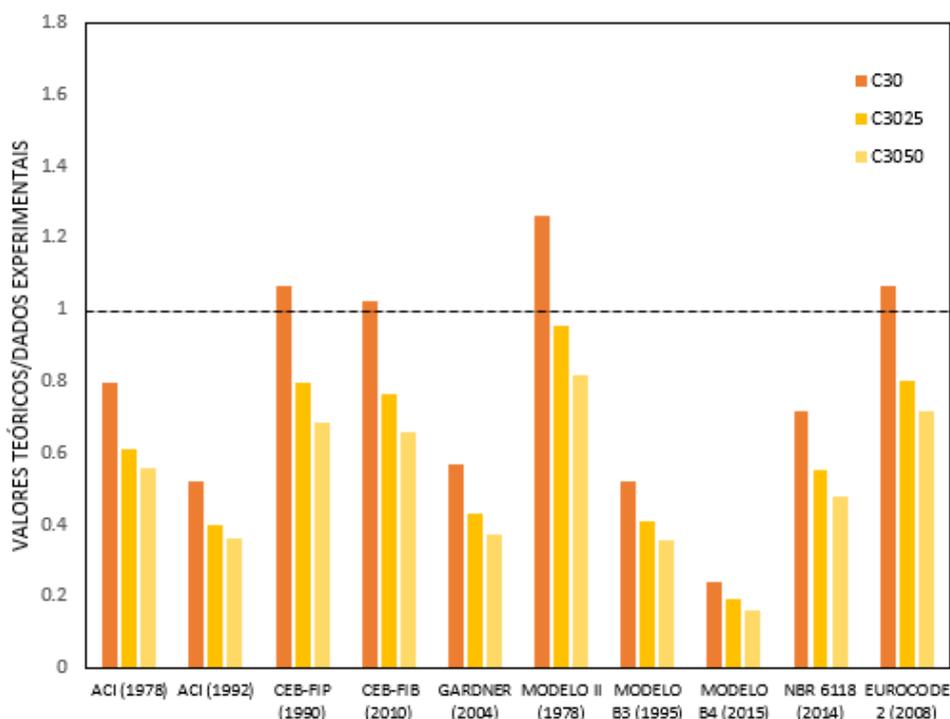
Resultado semelhante foi encontrado por Goel *et. al* (2007) em que os modelos ACI (1992), Gardner (2004) e CEP FIB (1990) apresentaram valores teóricos inferiores aos dados experimentais para concreto convencional com 32,4 e 63 MPa. Segundo Saleh e Saleh (2014) os modelos ACI (1992), Gardner (2004) e CEP FIB (1990) tendem a subestimar os dados experimentais dos concretos com agregado reciclado, e

em outras condições superestimam, afirmando que a previsão é imprecisa para diferentes condições de secagem, bem como dimensões e cura.

As Figuras 69 e 70 apresentam os resultados da razão média dos valores teóricos obtidos pelos modelos e os dados experimentais e na Tabela 55 estão os coeficientes de variação (%). No concreto C60, o modelo ACI (1978), Modelo II (1978), NBR 6118 (2014) e Eurocode (2008) apresentaram valores acima de 1,0, o que confirma os resultados obtidos pelo coeficiente de desvio.

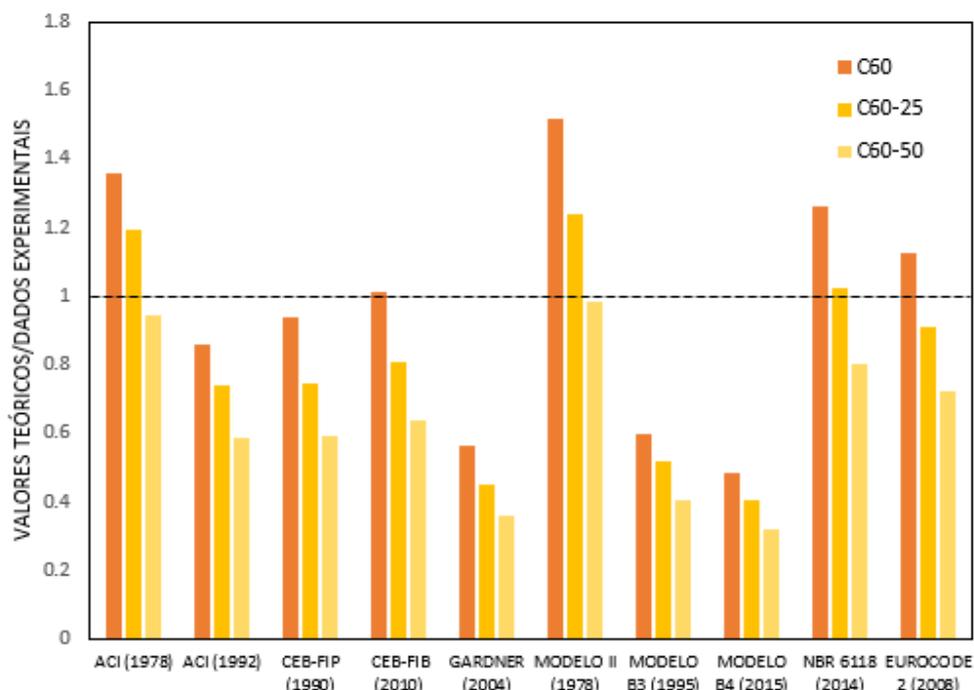
O resultado da razão média no concreto C6025 também apresentou valores superiores nos modelos ACI (1978), Modelo II (1978) e NBR 6118 (2014) e no C60-50 estão todos abaixo, indicando que a maioria dos modelos tendem a subestimar os valores da retração para os concretos com agregado reciclado. Resultado semelhante é obtido nos concretos C30, na qual apenas os modelos CEB-FIB (1990), CEB-FIP (2010), Modelo II (1978) e Eurocode 2 (2008) apresentaram valores superiores a 1,0.

Figura 69 – Relação valores teóricos e dados experimentais C30.



FONTE: Autora (2022).

Figura 70 – Relação valores teóricos e dados experimentais C60.



FONTE: Autora (2022).

Tabela 55 - Coeficiente de Variação (%) para os modelos de previsão dos concretos.

Modelos	Coeficiente de Variação (%)					
	C30	C3025	C3050	C60	C6025	C6050
ACI (1978)	11,09	19,50	31,13	13,01	18,82	29,31
ACI (1992)	20,02	31,93	42,22	13,01	18,82	29,31
CEB-FIP (1990)	33,38	26,90	12,53	27,51	10,78	15,50
CEB-FIB (2010)	33,32	27,04	13,30	27,51	10,78	15,50
GARDNER (2004)	31,10	33,32	33,60	22,04	7,66	18,44
MODELO II (1978)	30,38	23,94	11,32	23,76	8,13	17,10
MODELO B3 (1995)	32,36	34,87	36,31	21,86	7,66	18,60
MODELO B4 (2015)	64,22	82,30	100,74	20,89	7,93	19,66
NBR 6118 (2014)	20,74	22,46	22,9	22,04	6,59	12,98
EUROCODE 2 (2008)	7,23	7,87	19,71	17,36	11,24	16,81

FONTE: Autora (2022).

De acordo com as Figuras 69 e 70, os modelos CEB-FIP (1990) e CEB-FIB (2010) apresentam relação próximo a 1,0 para C30 e C60, resultado coerente com o obtido com o coeficiente de erro que indicava que os mesmos poderiam ser utilizados para estes concretos. No entanto, conforme Tabela 55 o coeficiente de variação é maior que 25% indicando que os valores não são homogêneos.

Os resultados obtidos com o modelo da NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2008) apresentam resultados homogêneos para todos os concretos (Tabela 55). Existe uma variação das relações obtidas com os outros modelos para o concreto com agregado reciclado apresentam resultados coerentes com os o coeficiente de erro e desvio encontrados. De forma geral, os outros modelos apresentam valores inferiores aos dados experimentais para os concretos com agregado reciclado, ou seja, razão média menor que 1,0 e coeficientes de variação que indicam valores não homogêneos para alguma das misturas.

As Figuras 71 e 72 mostram os resultados para relação valores teóricos /dados experimentais do concreto com agregado miúdo reciclado, na qual os valores teóricos foram corrigidos com a proposta de Seara-Paz *et al.* (2016), obtendo-se a razão com o valor médio corrigido (C3025 CORRIG, C3050 CORRIG, C6025 CORRIG e C6050 CORRIG).

A relação valores teóricos corrigidos/dados experimentais tendem a ser maiores do que aqueles não corrigidos. No entanto, os valores corrigidos são semelhantes ao encontrado sem correção para C30, na qual os valores teóricos obtidos pelos modelos são menores que os dados experimentais, apresentando valores inferiores a 1,0, sendo os modelos CEB-FIB (1990), CEB-FIB (2010), Modelo II (1978) e Eurocode 2 (2010) os que mais se aproximam de 1,0. Os modelos CEB-FIB (1990), CEB-FIB (2010), os valores corrigidos apresentam menores desvios (Tabela 56), indicando dados mais homogêneos após a correção. O coeficiente de variação para esses modelos é inferior a 25% para todas as misturas, que mostra uniformidade dos resultados. O mesmo não ocorre para os outros modelos, que apresentam resultados não homogêneos, apresentando misturas com coeficiente de variação maior que 25%, conforme Tabela 56.

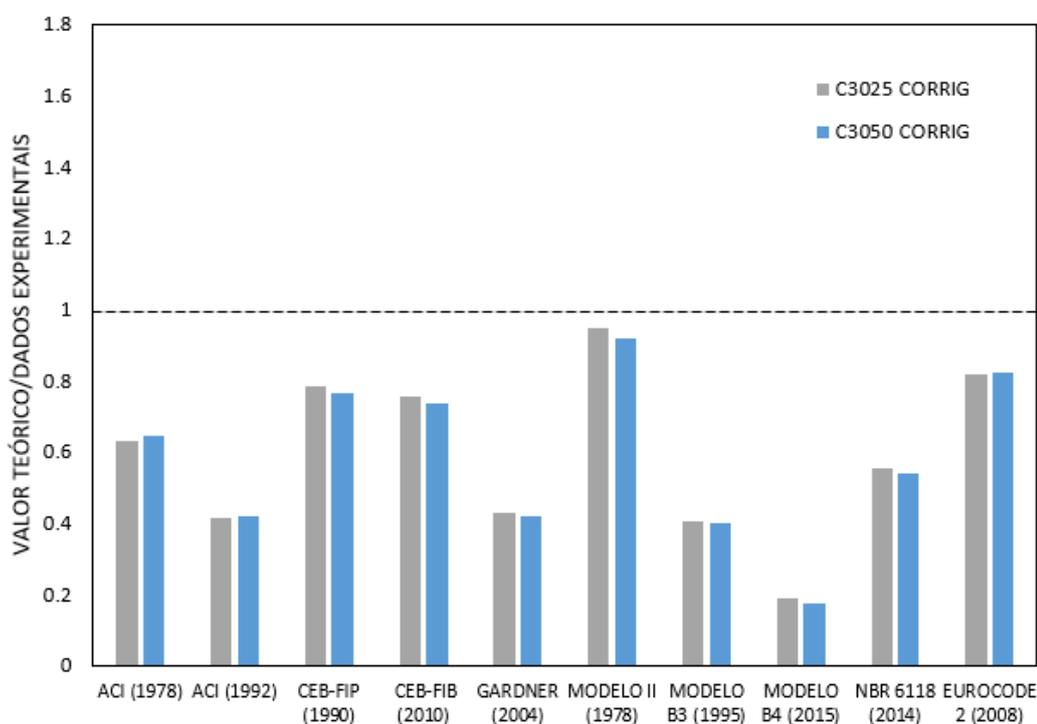
No concreto C6025 e C6050 para o modelo ACI 1978 os valores corrigidos são maiores que 1,0 superestimando os dados experimentais resultado esperado conforme o coeficiente de desvio. Nestes concretos, os demais modelos apresentam valores inferiores a 1,0, com exceção o Modelo II (1978) para a mistura C6050 CORRIG. No geral a relação valores teóricos/dados experimentais apresentaram após correção maiores desvios e maiores coeficientes de variação.

Os resultados mostram que a proposta de Seara-Paz *et al.* (2016) não foi adequada para os dados experimentais em análise e que gerou resultados menos homogêneos após a correção, com valores menos uniformes. Isto possivelmente é devido

ao modelo proposto para correção ter sido desenvolvido para concreto com agregado graúdo reciclado, devendo os valores teóricos e os dados experimentais apresentarem comportamento com o mesmo grau de aproximação dos concretos sem agregado reciclado.

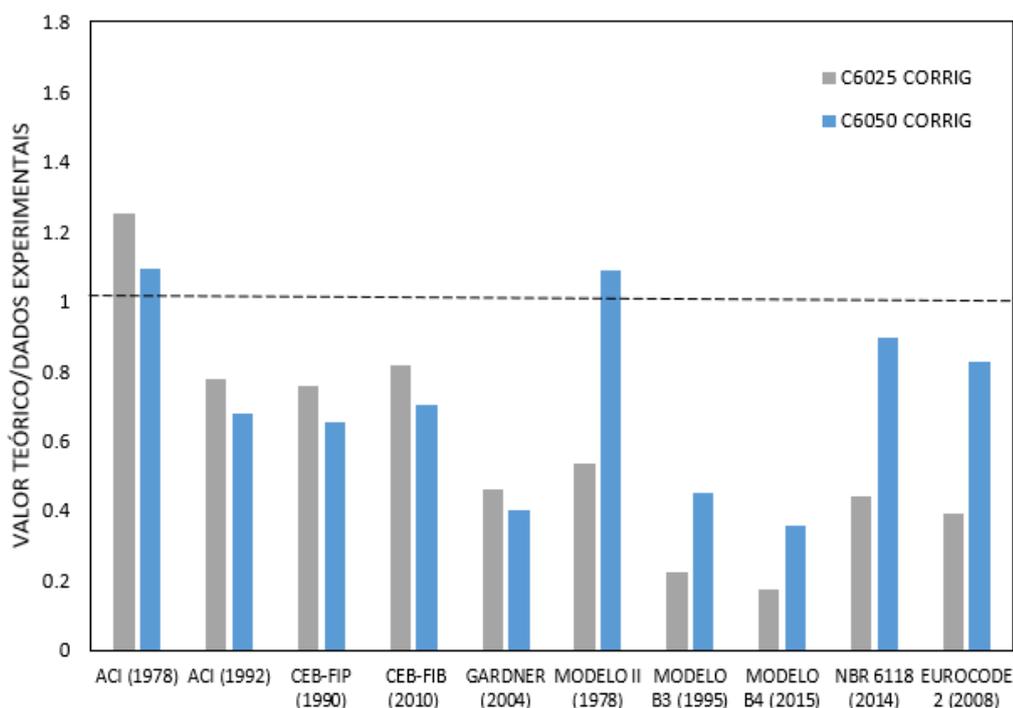
Alguns estudos indicam que os modelos tendem a superestimar a retração dos concretos com agregado natural, como o Eurocode 2 (2008), Modelo B3 (2015), o CEB-FIP (1990) (SILVA *et al.*, 2015a). Resultado semelhante foi encontrado para esses modelos no concreto com agregado natural (Figura 69 e 70). Seara-Paz *et al.* (2016) afirmam que os modelos fornecem deformações por retração maiores que as obtidas experimentalmente, mesmo quando se estudam concretos com agregado reciclado. Baseado nisso, a proposta de ajuste foi gerada, o que não é adequado para os concretos analisados.

Figura 71 – Relação valores teóricos corrigidos com proposta de Seara-Paz *et al.* (2016) e dados experimentais C30.



FONTE: Autora (2022).

Figura 72 – Relação valores teóricos corrigidos com proposta de Seara-Paz *et al.* (2016) e dados experimentais C60.



FONTE: Autora (2022).

Tabela 56 - Coeficiente de Variação (%) para os modelos de previsão dos concretos corrigidos com proposta de Seara-Paz *et al.* (2016).

Modelos	Coeficiente de Variação (%)			
	C3025 CORRIG	C3050 CORRIG	C6025 CORRIG	C6050 CORRIG
ACI (1978)	27,18	35,46	29,68	38,23
ACI (1992)	36,02	42,11	27,32	38,23
CEB-FIP (1990)	11,46	15,93	11,05	22,53
CEB-FIB (2010)	11,91	16,28	11,05	22,53
GARDNER (2004)	28,09	32,14	14,08	27,72
MODELO II (1978)	11,15	17,89	8,13	25,87
MODELO B3 (1995)	30,22	34,34	7,66	27,92
MODELO B4 (2015)	81,42	90,40	7,93	29,20
NBR 6118 (2014)	18,98	25,12	6,59	25,98
EUROCODE 2 (2008)	14,75	26,10	11,24	28,84

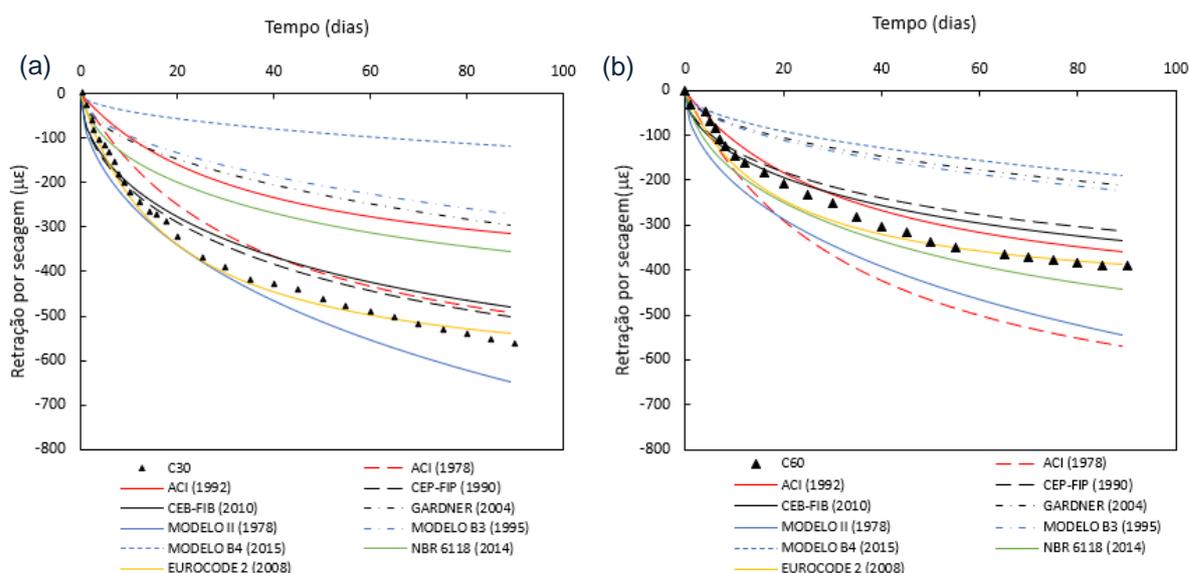
FONTE: Autora (2022).

#### 4.3.2.2 Modelos de Predição da Retração

As Figuras 73, 74 e 75 apresentam as curvas teóricas geradas com os modelos e os dados experimentais. Nos concretos sem agregado reciclado (C30 e C60) os modelos não descrevem de forma precisa o comportamento a retração ao longo do

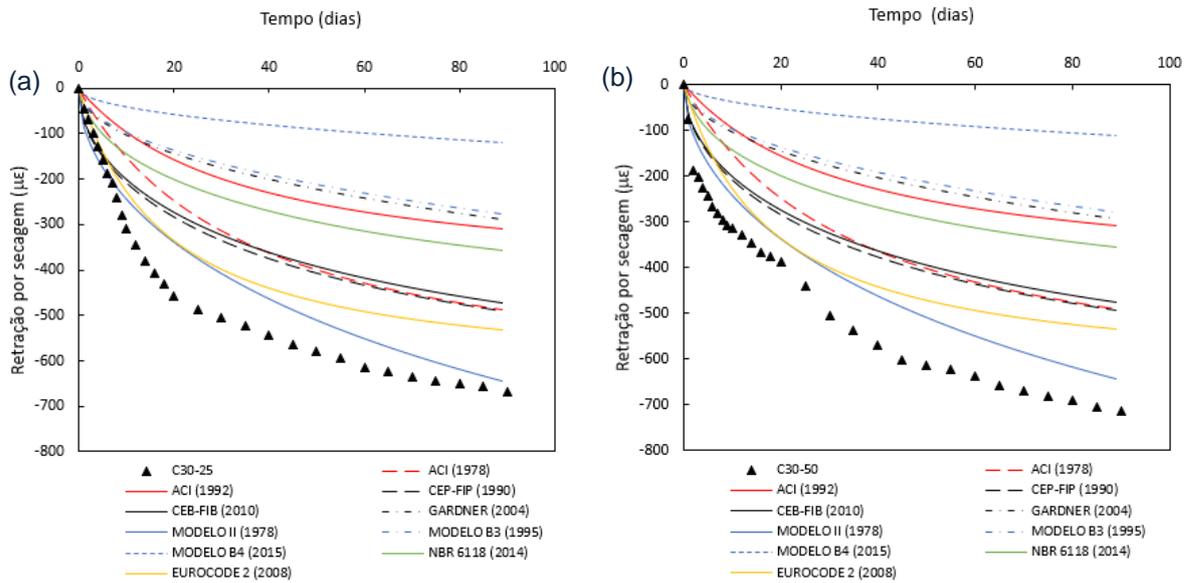
tempo, com exceção do Eurocode 2 (2008) que apresenta comportamento semelhante aos dados experimentais. No concreto C30, o Modelo II (1978) apresenta curva superior aos dados experimentais, enquanto os demais subestimam a deformação ao longo do tempo, resultado coerente com os indicadores estatísticos. No concreto de alto desempenho (C60), além do Eurocode 2 (2008), a NBR 6118 (2014) apresentou curva próxima aos dados experimentais, no entanto, a curva é superior aos valores experimentais, assim como o Modelo II (1978) e ACI (1978), os demais modelos geram curvas inferiores aos valores experimentais, resultado corroborado com os indicadores estatísticos.

Figura 73 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos C30 e C60.



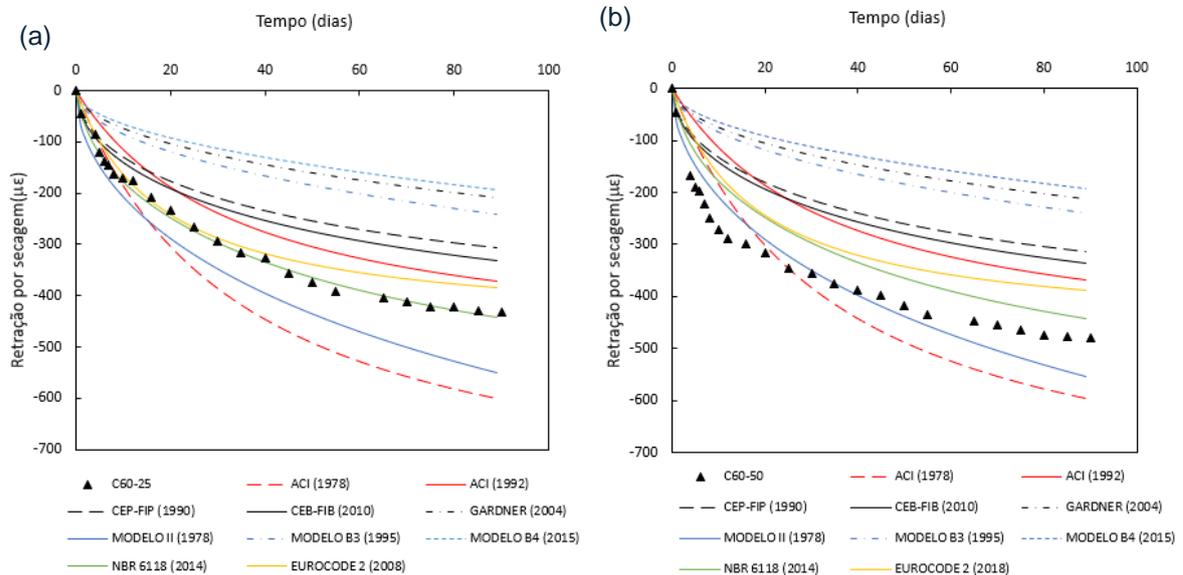
FONTE: Autora (2022).

Figura 74 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos C3025 e C3050.



FONTE: Autora (2022).

Figura 75 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos C6025 e C6050.



FONTE: Autora (2022).

Os resultados da Figura 73, Figura 74 e Figura 75, mostram que o modelo Gardner (2004), Modelo B3 (1995) e o Modelo B4 (2015) são os que apresentaram maior discrepância dos dados experimentais para todas as misturas, o que indica que as

expressões utilizadas pelos modelos não são capazes de representar o comportamento a retração dos concretos com agregado miúdo reciclado. Observa-se que os mesmos subestimam o valor da retração, resultado corroborado com a análise estatística realizada. Segundo Vinkler e Vitek (2017), o modelo B4 (2015) gera uma deformação que é subestimada, conforme mostrado na Figura 75.

Os modelos CEP-FIB (1990) e CEB-FIB (2010) também não descrevem o comportamento a retração do concreto com agregado miúdo (Figura 74 e 75). Possivelmente, devido aos parâmetros utilizados nas expressões teóricas estarem diretamente relacionados a resistência à compressão do concreto e não consideram parâmetros como teor de agregado miúdo e cimento.

Os modelos ACI (1978) e ACI (1992) consideram os mesmos parâmetros para prever o comportamento a retração. No entanto, verifica-se que o modelo ACI (1978) apresenta a curva teórica superior a curva gerada pelo ACI (1992) para todos os concretos (Figuras 73, 74 e 75). A diferença existente entre os dois modelos está nas expressões que são utilizadas para determinar os fatores relacionados a umidade relativa, dimensão da peça e abatimento, na qual o ACI (1978) gera valores superiores ao ACI (1992). O fator que apresenta maior diferença é aquele relacionado as dimensões da peça, na qual para o ACI (1978) é na ordem de 1,25 e para o ACI (1992) em torno de 0,84, afetando diretamente os valores da retração obtidos pelos modelos.

A curva teórica gerada pelo modelo ACI (1978) apresenta valores inferiores aos dados experimentais para o concreto de resistência normal (C30), mas nos concretos de alta resistência (C60) a curva tende a superestimar os valores da retração (Figura 73). Isto é em decorrência do teor de cimento, pois a relação agregado miúdo/total de agregado é a mesma para os concretos C30 e C60, mantendo-se também nos concretos C30-25 e C60-25, bem como nos C30-50 e C60-50, e o *slump* não altera significativamente as curvas teóricas dos concretos nesse modelo. Nos concretos C60 o teor de cimento é  $533 \text{ kg/m}^3$ , enquanto no C30 é  $329,3 \text{ kg/m}^3$ . Desta forma, o teor de cimento tem influência no aumento dos valores teóricos obtidos pelo modelo ACI (1978) nos concretos C60.

Há um consenso que tanto os concretos com agregado natural, quanto com agregado reciclado seguem a Lei de Abrams (CABRAL *et al.*, 2010), em que para menores relações água/cimento maiores as resistências, gerando um concreto menos

poroso, com menores valores de retração por secagem. Os dados experimentais do concreto C60 são menores que C30, o que era esperado devido a menor relação água/cimento dos concretos C60, pois quanto menor a relação água/cimento, menor a retração por secagem. No entanto, apesar dos dados experimentais reduzirem com o aumento da resistência, a curva teórica do ACI (1978) aumenta em decorrência do maior teor de cimento presente nos concretos C60. Assim, a mesma tende a apresentar valores teóricos superiores aos dados experimentais. As curvas teóricas obtidas com o modelo ACI (1992) se mantêm abaixo dos valores experimentais tanto nos concretos C30, quanto no C60.

Nos concretos C3025 e C3050 (Figura 74), o Modelo II (1978) foi o que apresentou curva mais próxima aos dados experimentais, no entanto, o mesmo subestima os valores da retração ao longo do tempo, resultado esperado conforme indicadores estatísticos. Já nos concretos C6025 e C6050 a curva teórica da NBR 6118 (2014) foi a que mais se aproximou dos dados experimentais (Figura 75).

Verifica-se nas Figuras 74, 75 e 76 o comportamento esperado nas curvas teóricas na qual todos os modelos possuem forte correlação entre os valores experimentais e os calculados, o que era esperado segundo Silva *et al.* (2015a). De acordo com Silva *et al.* (2015a) estes modelos podem ser usados para prever com precisão a deformação devido a retração no concreto se for calibrado com testes de curto prazo no concreto real a ser usado em o projeto. Conforme Bazant e Baweja (2000), a diferença dos resultados dos modelos com os dados experimentais é em decorrência da composição das misturas e resistência à compressão, que se ajustados os parâmetros é possível prever adequadamente a retração dos concretos.

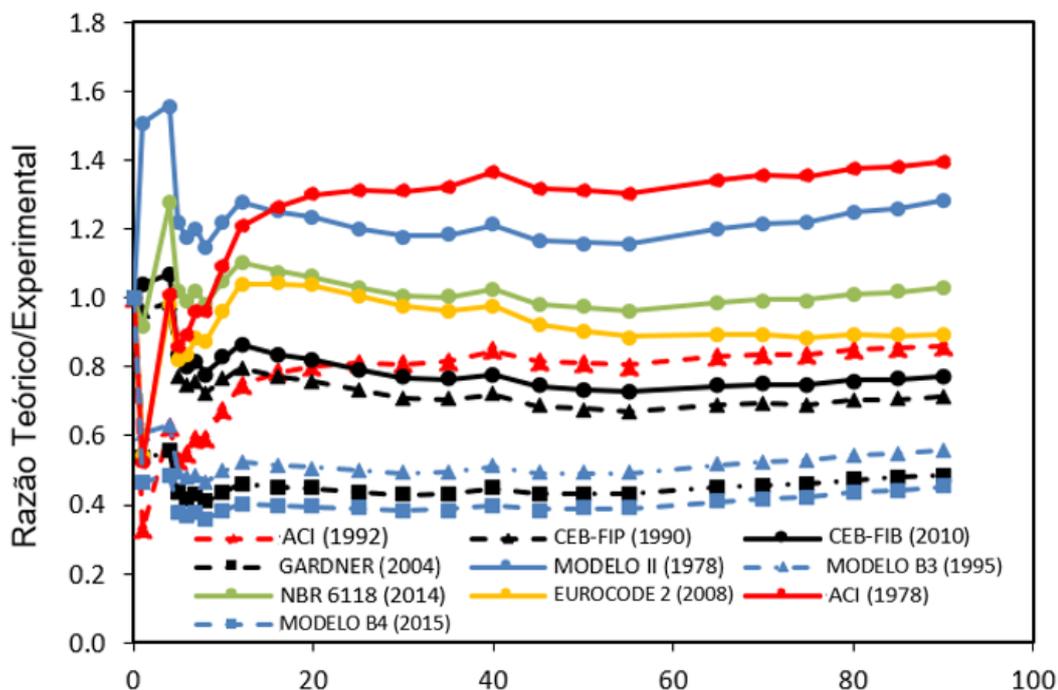
No entanto, calibrar os modelos para o concreto real a ser utilizado deve ser prático e a curto prazo para que possa ser aplicado em projetos que precisam prever o comportamento do concreto, sobretudo com agregado reciclado, na qual a retração é maior. Os modelos de forma geral, geram valores teóricos inferiores ao valor experimental. Desta forma, é necessário nos concretos com agregado reciclado a obtenção de modelos que sejam capazes de prever adequadamente a retração do concreto e que considerem o teor de agregado reciclado, já que o mesmo tem influência direta na retração.

#### 4.3.2.3 Proposta de Correção dos Modelos

Buscando melhorar a adequação das expressões dos modelos existentes para prever a retração por secagem, uma nova função foi ajustada com base no trabalho de Seara-Paz *et al.* (2016). O fator de correção, mais simplificado, considera a razão retração teórica/retração experimental do concreto convencional e os percentuais de substituição dos agregados miúdos reciclados. A seguir são apresentados os resultados analisados para adequação dos modelos.

A Figura 76 mostra um exemplo da variação da razão retração calculada/retração experimental para a mistura C60-25. Este comportamento é observado em todas as misturas e para todos os modelos teóricos utilizados. É possível verificar que a razão retração calculada/retração experimental varia significativamente nos primeiros 20 dias do teste da retração por secagem, mas permanece praticamente constante após esse tempo.

Figura 76 – Variação típica da razão retração teórica/retração experimental obtido para os diferentes modelos.

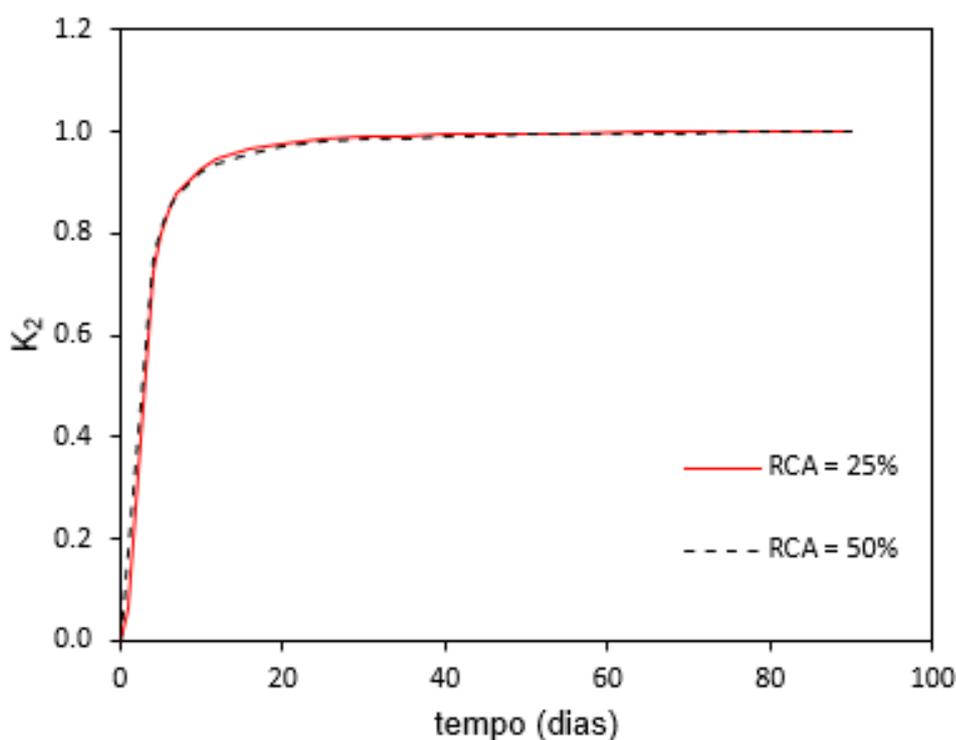


FONTE: Autora (2022).

Analisando a proposta do modelo de Seara-Paz *et al.* (2016) para concreto com agregado reciclado, verificou-se que o segundo termo da Equação 100, equivalente

ao  $K_2$  da equação 97 e 99 do modelo de Seara-Paz *et al.* (2016) para concreto com agregado reciclado pode ser desconsiderado. Constatou-se que os valores mais relevantes para o projeto de estruturas de concreto obtêm-se valores máximos de retração próximo aos 90 dias, e que de fato, a avaliação temporal do termo  $K_2$ , proposto por Seara-Paz *et al.* (2016) e mostrada na Figura 77, demonstra que este tende ao valor unitário após 20 dias.

Figura 77 – Evolução do tempo  $K_2$  ao longo do tempo.



FONTE: Autora (2022).

Baseado na análise dos resultados experimentais e na proposta de Seara-Paz *et al.* (2016) foi proposto o novo coeficiente de correção ( $K_c$ ), conforme apresentado nas Equações 121 e 122. A retração por secagem ( $\varepsilon_{sh,code}$ ) determinada pelos modelos teóricos é corrigida por  $\left(\frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,c,con}}\right)$  que é razão retração experimental/retração calculada em 90 dias e considera a porcentagem de agregado miúdo reciclado (RFA). A Tabela 57 apresenta os valores obtidos da relação retração teórica/retração experimental  $\left(\frac{\varepsilon_{sh,t,con}}{\varepsilon_{sh,e,con}}\right)$  para o concreto convencional em 90 dias.

Tabela 57 - Relação da retração teórica /retração experimental para concreto convencional.

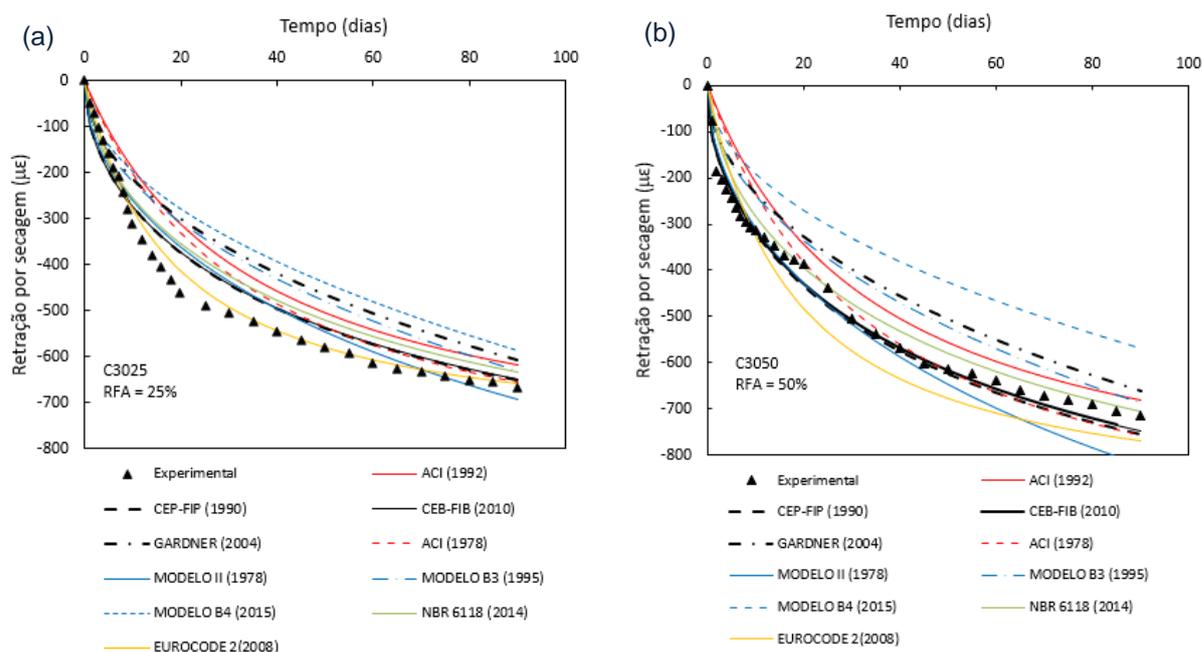
Misturas	$\frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,c,con}}$									
	ACI (1978)	ACI (1992)	CEB-FIP (1990)	CEB-FIP (2010)	GARDNER (2004)	MODELO II (1978)	MODELO B3 (1995)	MODELO B4 (2015)	NBR 6118 (2014)	EUROCODE 2 (2008)
C30	1,14	1,79	1,12	1,17	1,88	0,87	2,06	4,70	1,57	1,04
C60	0,69	1,08	1,25	1,16	1,85	0,71	1,73	2,05	0,88	1,00

FONTE: Autora (2022).

Os resultados obtidos na Tabela 57 mostram que o modelo Eurocode 2 (2008) mostra-se adequado para prever a retração do concreto convencional, o que corrobora com as análises estatísticas e as curvas teóricas geradas.

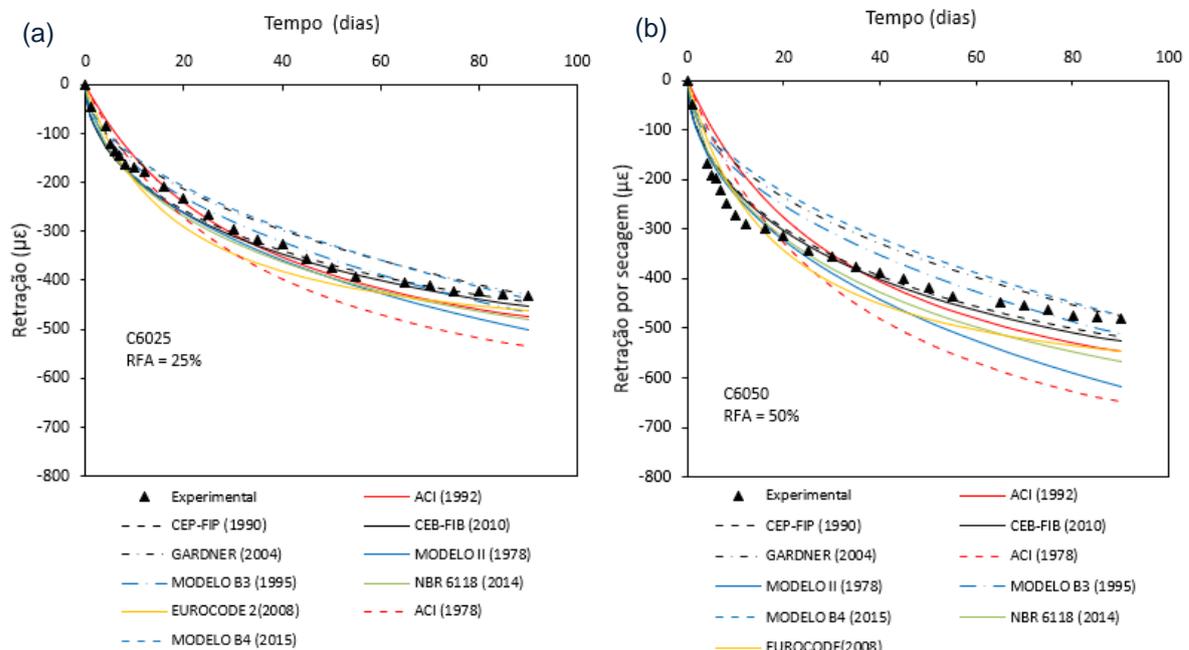
As curvas teóricas da retração por secagem ao longo do tempo para os concretos com agregado miúdo reciclado, após a aplicação do coeficiente de correção (Equação 99), são apresentados nas Figuras 78 e 79.

Figura 78 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos C3025 e C3050 após a correção.



FONTE: Autora (2022).

Figura 79 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos C6025 e C6050 após a correção.



FONTE: Autora (2022).

Os resultados apresentados nas Figuras 78 e 79, após correção mostram que todas as curvas tendem a se aproximar do valor experimental. Nos concretos C3025 e C3050 o modelo Eurocode 2 (2008) apresentou um ajuste adequado e apresentou coeficiente de erro menor ou igual a 15% para todas as misturas (Tabela 59). O modelo II (1978) segue a tendência da curva sem correção nos concretos C3025, apresentando-se próxima aos valores experimentais, já nos concretos C3050 a curva teórica superestima os valores experimentais após correção. No entanto, nas misturas C6050, o modelo II (1978) apresenta coeficiente de erro superior a 20% mesmo após correção. Nos concretos C3050 (Figura 78, b), o modelo da NBR 6118 (2014) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais após correção e apresentou coeficiente de erro inferior a 15%.

De forma geral, há uma boa concordância entre os modelos teórico e experimental, como pode ser observado nas Tabelas 58, 59, 60 e 61, que apresenta o coeficiente de erro M% e o coeficiente de desvio D% para os valores teóricos calculados sem o coeficiente de correção (Tabelas 56 e 57) e após o coeficiente de correção (Tabela 58 e 59). Verifica-se que há uma redução no erro após utilizar o coeficiente de correção para todos os modelos.

Os modelos propostos pelo CEB-FIP (1990) e CEB-FIB (2010) apresentaram valores de erro inferiores a 10% para todos os concretos, caracterizando-os como adequados para a previsão da retração por secagem dos concretos com agregado miúdo reciclado, sendo esses modelos o que mais se ajustaram aos dados experimentais após correção dos concretos C6025 e C6050 (Figura 79). Os valores do coeficiente de desvio seguiram a mesma tendência observada para o coeficiente de erro.

Tabela 58 – Valores do coeficiente de Erro (%) para os modelos de previsão dos concretos.

Modelos	M (%)			
	C3025	C3050	C6025	C6050
ACI (1978)	24	26	31	23
ACI (1992)	40	42	18	37
CEB-FIP (1990)	21	23	27	43
CEB-FIB (2010)	23	24	22	38
GARDNER (2004)	42	44	50	67
MODELO II (1978)	10	11	30	31
MODELO B3 (1995)	43	46	34	34
MODELO B4 (2015)	58	61	44	44
NBR 6118 (2014)	34	36	12	12
EUROCODE 2 (2008)	15	17	6	7

FONTE: Autora (2022).

Tabela 59 – Valores do coeficiente de Desvio (%) para os modelos de previsão dos concretos.

Modelos	D (%)			
	C3025	C3050	C6025	C6050
ACI (1978)	-34	-35	28	3
ACI (1992)	-57	-56	-21	-36
CEB-FIP (1990)	-29	-30	-28	-40
CEB-FIB (2010)	-31	-32	-22	-36
GARDNER (2004)	-60	-58	-55	-63
MODELO II (1978)	-12	-15	22	0
MODELO B3 (1995)	-61	-60	-49	-58
MODELO B4 (2015)	-81	-80	-59	-67
NBR 6118 (2014)	-48	-48	1	-17
EUROCODE 2 (2008)	-21	-22	-8	-24

FONTE: Autora (2022).

Tabela 60 – Valores do coeficiente de Erro (%) para os modelos de previsão dos concretos corrigidos.

Modelos	M (%)			
	C3025	C3050	C6025	C6050
ACI (1978)	11	7	18	31
ACI (1992)	13	10	8	19
CEB-FIP (1990)	6	3	5	9
CEB-FIB (2010)	6	3	6	9
GARDNER (2004)	15	12	8	20
MODELO II (1978)	7	7	10	21
MODELO B3 (1995)	13	10	4	16
MODELO B4 (2015)	17	21	9	22
NBR 6118 (2014)	8	4	8	15
EUROCODE 2 (2008)	3	8	11	15

FONTE: Autora (2022).

Tabela 61 – Valores do coeficiente de Desvio (%) para os modelos de previsão dos concretos corrigidos.

Modelos	D (%)			
	C3025	C3050	C6025	C6050
ACI (1978)	-13	-3	14	13
ACI (1992)	-18	-13	1	-5
CEB-FIP (1990)	-7	3	4	-1
CEB-FIB (2010)	-8	2	6	0
GARDNER (2004)	-20	-16	-8	-17
MODELO II (1978)	-7	6	11	11
MODELO B3 (1995)	-18	-13	-1	-11
MODELO B4 (2015)	-24	-28	-9	-19
NBR 6118 (2014)	-11	-4	9	6
EUROCODE 2 (2008)	-2	9	11	6

FONTE: Autora (2022).

Os baixos valores do coeficiente de erro M% e do coeficiente de desvio D% das Tabelas 60 e 61 indicam que, uma vez conhecido o valor de retração experimental do concreto convencional, é possível estimar a retração por secagem do concreto com agregado miúdo reciclado utilizando o coeficiente de correção proposto. Devido à sua simplicidade, o fator de correção proposto é acessível a engenheiros com pouco conhecimento especializado sobre os detalhes da retração por secagem do concreto e pode ser facilmente calibrado com testes de curto prazo. Acredita-se que, com base

em novos estudos, será possível obter uma melhor calibração para a Equação 122, para que possa ser utilizado nos padrões de projeto para concreto armado contendo agregados miúdos reciclados.

A Tabela 62 apresenta um resumo dos resultados obtidos indicando os modelos considerados adequados para prever a retração do concreto com agregado miúdo após correção, conforme análise das curvas teóricas e a análise estatística desenvolvida. Foram considerados não adequados aqueles modelos mais distantes da curva teórica e que mesmo após a correção ainda apresentavam coeficiente de erro maior que 15% para qualquer das misturas.

Tabela 62 – Resultados dos modelos de previsão dos concretos corrigidos.

MODELOS	ANÁLISE
ACI (1978)	NÃO ADEQUADO
ACI (1992)	NÃO ADEQUADO
CEB-FIP (1990)	ADEQUADO
CEB-FIB (2010)	ADEQUADO
GARDNER (2004)	NÃO ADEQUADO
MODELO II (1978)	NÃO ADEQUADO
MODELO B3 (1995)	NÃO ADEQUADO
MODELO B4 (2015)	NÃO ADEQUADO
NBR 6118 (2014)	ADEQUADO
EUROCODE 2 (2008)	ADEQUADO

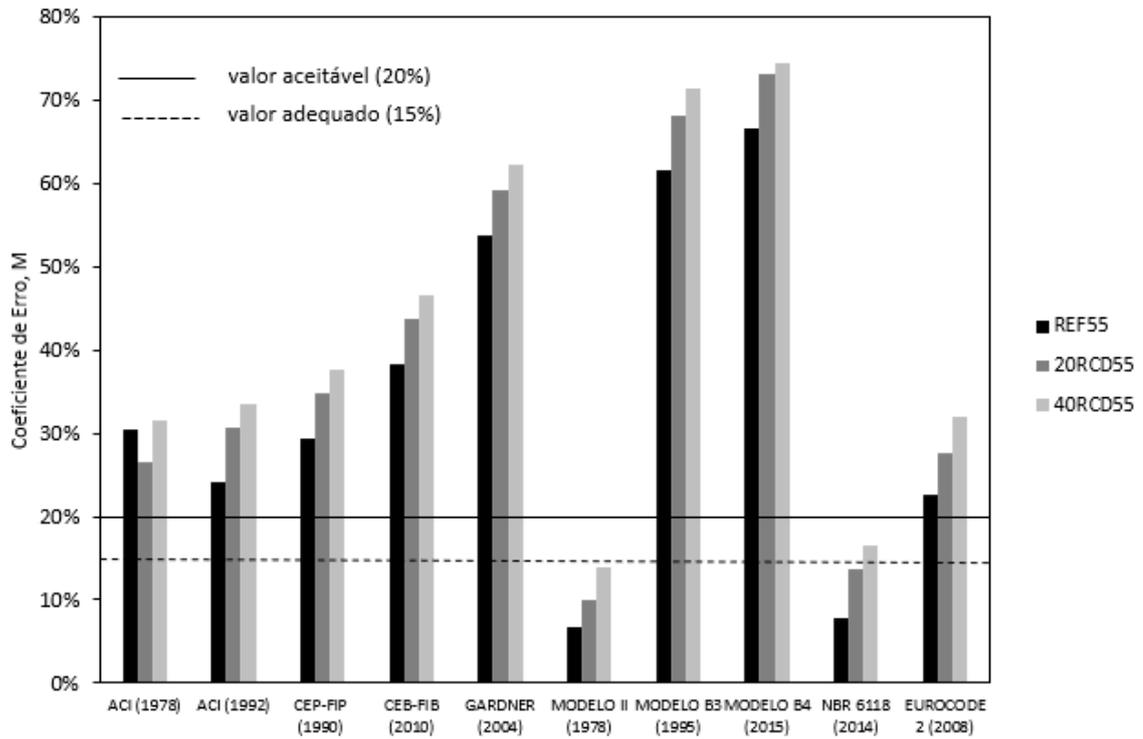
FONTE: Autora (2022).

### 4.3.3 Modelagem com Agregado Graúdo Reciclado

#### 4.3.3.1 Indicadores Estatísticos

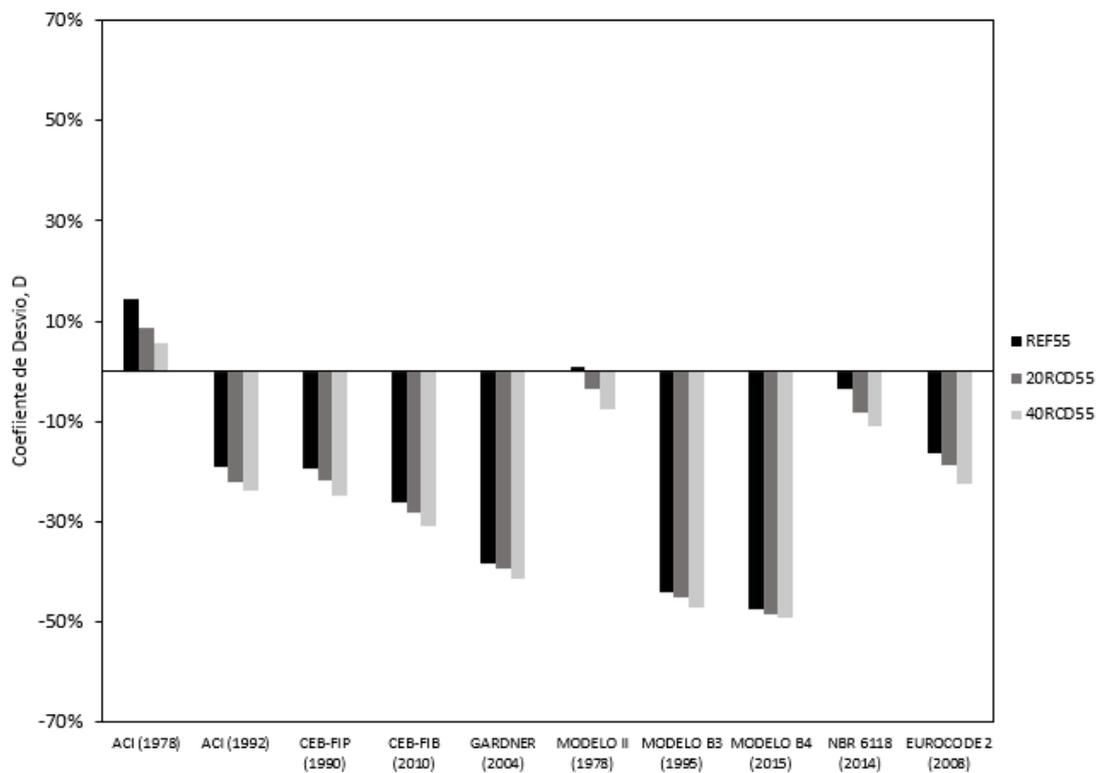
Os valores do coeficiente de erro, M%, e coeficiente de desvio, D%, que medem a precisão dos modelos com agregado graúdo reciclado, são mostrados nas Figuras 80 e 81. A partir dessas considerações, o Modelo II (1978) e a NBR 6118 (2014) são aceitáveis para prever o comportamento dos concretos. Na qual o modelo da NBR 6118 (2014) só não foi adequado para o 40RCD55 (Figura 80).

Figura 80 – Valores do coeficiente de erro M (%) para os modelos de previsão.



FONTE: Autora (2022).

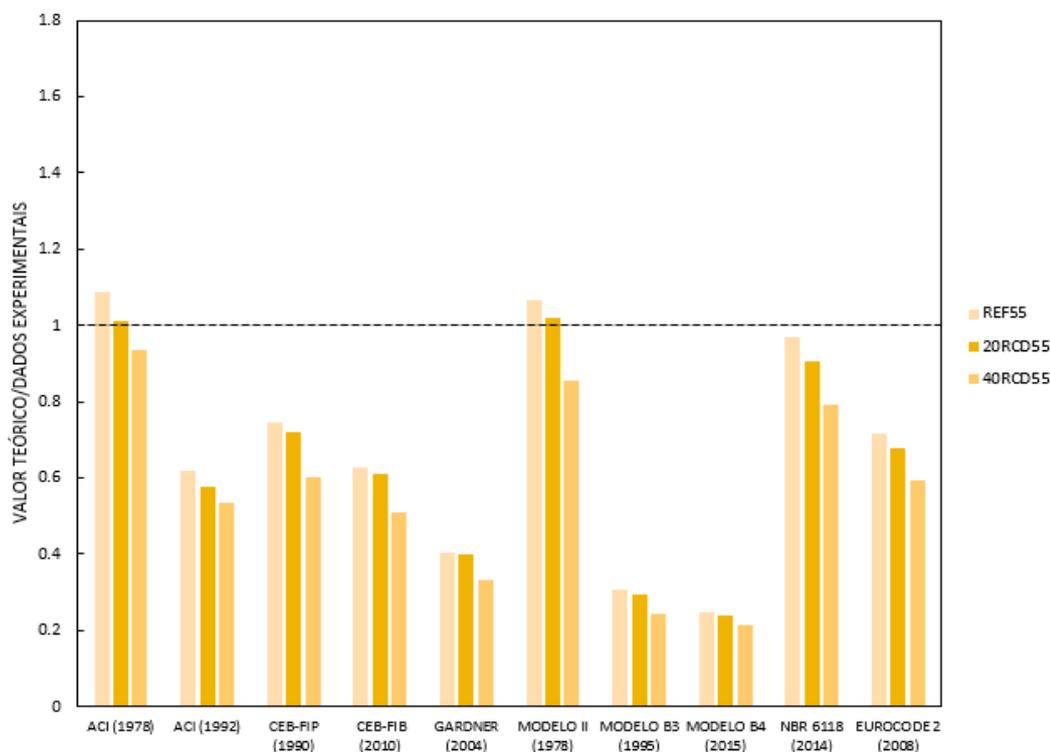
Figura 81 – Coeficiente de desvio D (%) para os modelos de previsão.



FONTE: Autora (2022).

A Figura 81 mostra o coeficiente de desvio, D, para todos os modelos utilizados. Os valores encontrados para D indicam que todos os modelos estudados subestimam os valores de retração por secagem, com exceção do ACI (1978) e Modelo II (1978) para REF55. Resultado semelhante foi encontrado na literatura (GOEL *et. al*, 2007; SALEH, SALEH, 2014).

Figura 82 – Relação valores teóricos médios e dados experimentais.



FONTE: Autora (2022).

A Figura 82 apresenta os resultados da razão média dos valores teóricos obtidos pelos modelos e os dados experimentais e na Tabela 63 estão os coeficientes de variação (%). O modelo ACI (1978) e modelo II (1978) apresentaram valores acima de 1,0, o que confirma os resultados obtidos pelo coeficiente de desvio, com exceção do concreto 40RCD55. No entanto, no modelo ACI (1978) o coeficiente de variação para o concreto 40RCD55 é maior que 25% indicando que os valores não são homogêneos. O Modelo II (1978) e da NBR 6118 (2014) apresentam resultados homogêneos para todos os concretos (Tabela 63).

De forma geral, os modelos tendem a gerar valores inferiores aos dados experimentais (Figura 82), ou seja, razão média menor que 1,0 e os coeficientes de variação indicam que os dados não são homogêneos para maioria das misturas (Tabela

63). O resultado indica que a maioria dos modelos tendem a apresentar valores da retração inferiores aos dados experimentais e existe uma variação entre os valores determinados numericamente.

Tabela 63 - Coeficiente de Variação (%) para os modelos de previsão dos concretos.

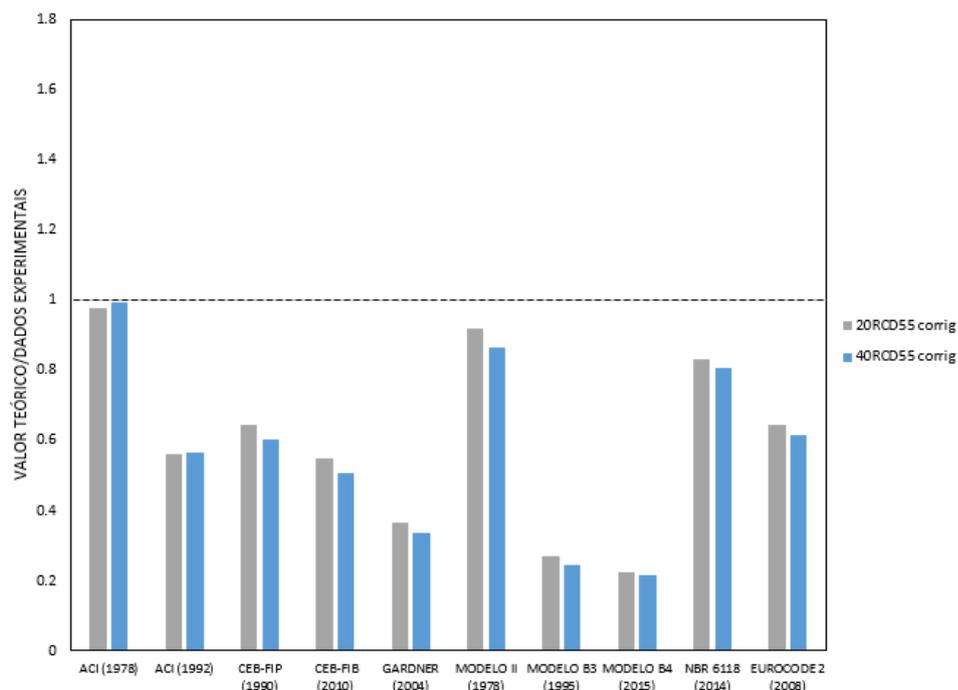
Modelos	Coeficiente de Variação (%)		
	REF55	20RCD55	40RCD55
ACI (1978)	25,21	23,51	37,81
ACI (1992)	29,61	30,51	43,31
CEB-FIP (1990)	18,22	27,76	21,52
CEB-FIB (2010)	22,76	31,00	29,59
GARDNER (2004)	44,07	48,21	59,35
MODELO II (1978)	13,68	24,18	13,47
MODELO B3 (1995)	65,77	71,42	90,66
MODELO B4 (2015)	87,28	93,14	107,44
NBR 6118 (2014)	10,33	14,23	16,28
EUROCODE 2 (2008)	17,88	16,47	30,57

FONTE: Autora (2022).

A Figura 83 apresenta o resultado para relação valores teóricos /dados experimentais do concreto com agregado graúdo reciclado, na qual os valores teóricos foram corrigidos com a proposta de Seara-Paz *et al.* (2016), obtendo-se a razão com o valor médio corrigido (20RCD55CORRIG, 40RCD55CORRIG). Após a correção todos os modelos apresentaram valores inferiores ao experimental, conforme mostrado na Figura 83, além disso, o coeficiente de variação aumentou (Tabela 64). A Tabela 64 mostra que os resultados não são homogêneos, apresentando misturas com coeficiente de variação maior que 25%, com exceção do Modelo II (1978) que permaneceu com coeficiente inferior a 25% para 20RCD55CORRIG e 40RCD55CORRIG.

O resultado foi semelhante ao encontrado nas misturas com agregado miúdo reciclado, na qual a proposta de Seara-Paz *et al.* (2016) mostrou-se não adequada para os dados experimentais dos concretos com agregado miúdo e também gerou resultados menos homogêneos após a correção, com valores menos uniformes. Apesar do modelo proposto por Seara-Paz *et al.* (2016) para correção ter sido desenvolvido para concreto com agregado graúdo reciclado, a proposta de ajuste foi gerada baseada que os modelos tendem a superestimar a retração, o que não é adequado para os concretos analisados.

Figura 83 – Relação valores teóricos corrigidos com proposta de Seara-Paz *et al.* (2016). e dados experimentais.



FONTE: Autora (2022).

Tabela 64 - Coeficiente de Variação (%) para os modelos de previsão dos concretos corrigidos com proposta de Seara-Paz *et al.* (2016).

Modelos	Coeficiente de Variação (%)	
	20RCD55 CORRIG	40RCD55 CORRIG
ACI (1978)	37,16	48,72
ACI (1992)	42,14	51,40
CEB-FIP (1990)	18,73	28,23
CEB-FIB (2010)	26,04	34,90
GARDNER (2004)	52,82	63,14
MODELO II (1978)	12,19	24,89
MODELO B3 (1995)	79,41	93,31
MODELO B4 (2015)	102,99	109,74
NBR 6118 (2014)	15,97	28,24
EUROCODE 2 (2008)	28,52	39,39

FONTE: Autora (2022).

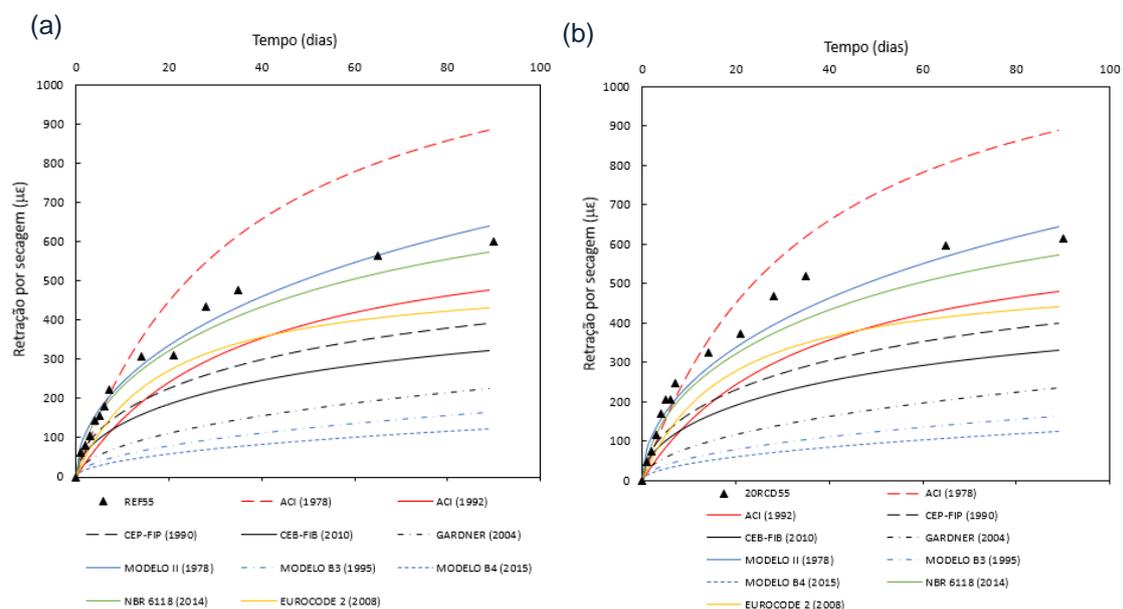
#### 4.3.3.2 Modelos de Predição da Retração

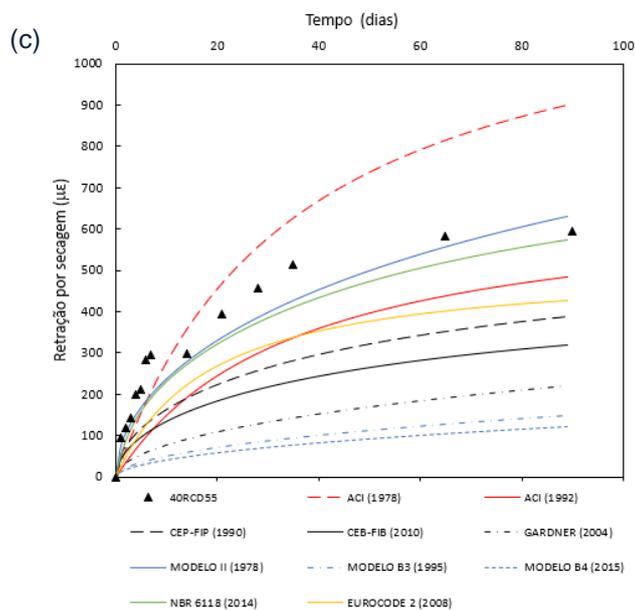
A Figura 84 (a), (b) e (c) apresenta as curvas teóricas geradas com os modelos e os dados experimentais dos concretos com agregado graúdo reciclado. Nos concretos sem agregado reciclado (Figura 84, a) e nas misturas com agregado graúdo reciclado (Figura 84, b e c), os modelos que mais se aproximam da curva teórica são o Modelo II (1978) e o da NBR 6118 (2014). Todos os modelos apresentam valores inferiores aos dados experimentais com exceção do ACI (1978), resultado corroborado com a análise estatística realizada.

Os resultados obtidos conforme Figura 84 são semelhantes aos obtidos nas misturas com agregado miúdo reciclado, na qual o modelo Gardner (2004), Modelo B3 (1995) e o Modelo B4 (2015) são os que apresentaram maior discrepância dos dados experimentais para todas as misturas, o que indica que as expressões utilizadas pelos modelos não são capazes de representar o comportamento a retração dos concretos com agregado miúdo reciclado, como com graúdo reciclado.

Os modelos seguem o mesmo comportamento que ocorreu nas misturas com agregado miúdo reciclado, de forma geral, geram valores teóricos inferiores ao valor experimental. Observa-se comportamentos semelhantes tanto nas misturas sem agregado reciclado (Figura 84, a), quanto nas misturas com 20% e 40% de agregado graúdo reciclado, Figura 84 (b) e (c), respectivamente.

Figura 84 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo nos concretos REF55, 20RCD55, 40RCD55.





FONTE: Autora (2022).

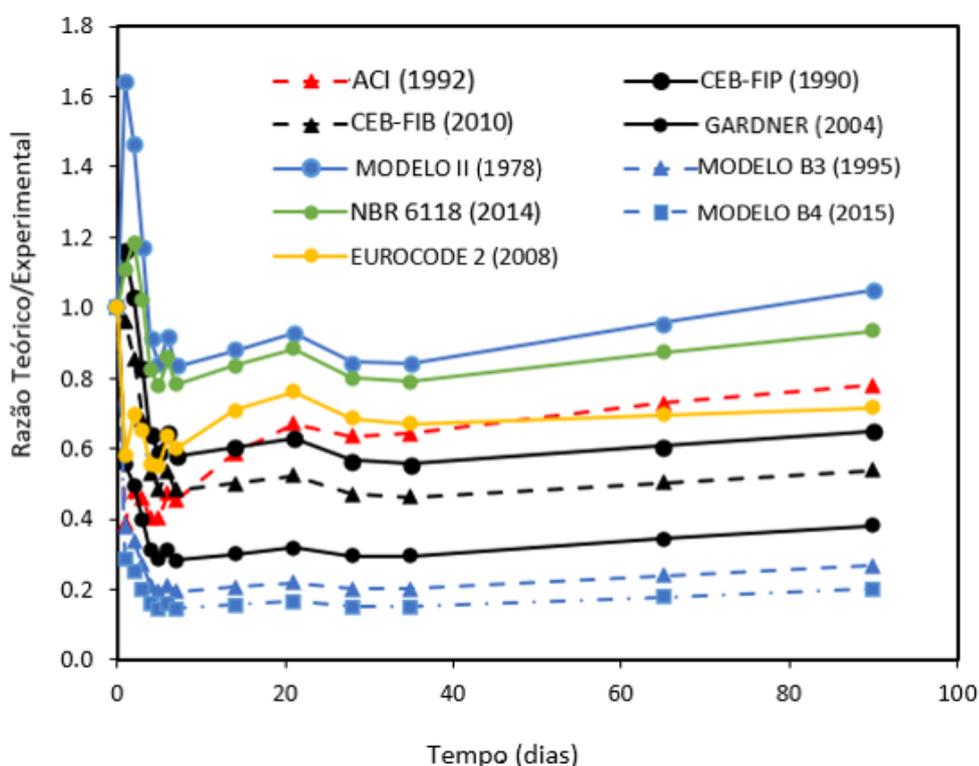
Verifica-se o comportamento esperado nas curvas teóricas na qual todos os modelos possuem forte correlação entre os valores experimentais e os calculados, conforme ocorreu também nas misturas com agregado miúdo reciclado e está de acordo com esperado segundo Silva *et al.* (2015a). É possível ajustar estes modelos para prever com precisão a retração no concreto se for calibrado com testes de curto prazo (SILVA *et al.*, 2015a). É necessário a obtenção de modelos que sejam capazes de prever adequadamente a retração do concreto com agregado graúdo reciclado e que considerem o teor de agregado reciclado, já que o mesmo tem influência na retração.

#### 4.3.3.3 Proposta de Correção dos Modelos

De forma semelhante ao que foi realizado no concreto com agregado miúdo reciclado, uma nova função foi ajustada com base no trabalho de Seara-Paz *et al.* (2016). O fator de correção, mais simplificado, considera a razão retração teórica/retração experimental do concreto convencional e os percentuais de substituição dos agregados graúdos reciclados. A seguir são apresentados os resultados analisados para adequação dos modelos.

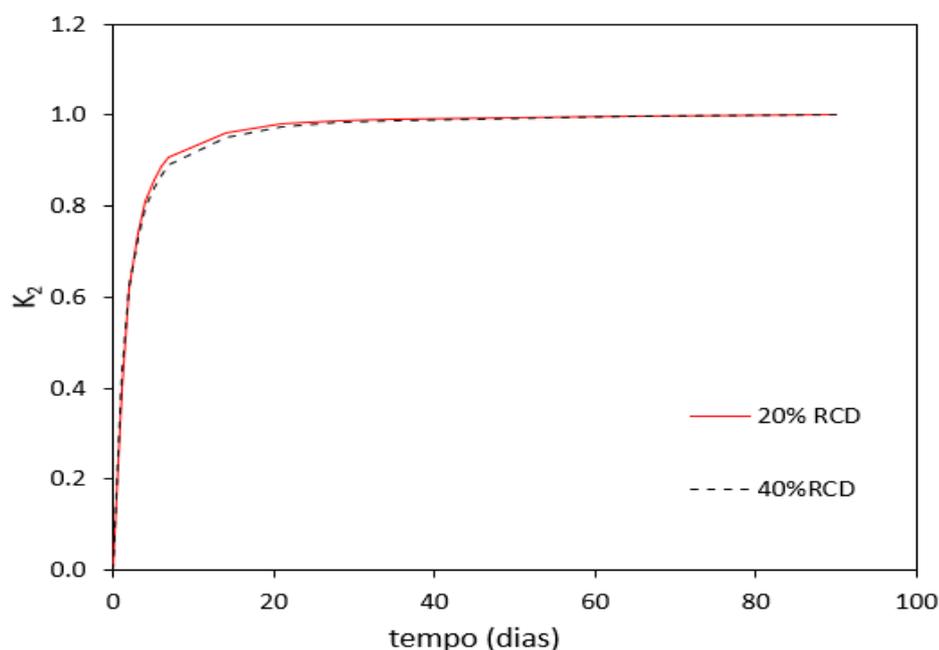
A Figura 85 mostra um exemplo da variação da razão retração calculada/retração experimental para a mistura 20RCD55. Este comportamento é observado em todas as misturas, como ocorreu também nas misturas com agregado miúdo reciclado, e para todos os modelos teóricos utilizados. Verificou-se que a razão retração calculada/retração experimental varia significativamente nos primeiros 20 dias do teste da retração por secagem dos concretos com agregado graúdo, mas permanece praticamente constante após esse tempo.

Figura 85 – Variação típica da razão retração teórica/ retração experimental obtido para os diferentes modelos (20RCD55).



FONTE: Autora (2022).

De forma semelhante ao que foi observado nos concretos com agregado miúdo reciclado, verificou-se que o segundo termo da Equação 100, equivalente ao  $K_2$  da equação 97 e 99 do modelo de Seara-Paz *et al.* (2016) pode ser desconsiderado também para as misturas com agregado graúdo reciclado. Constatou-se que os valores mais relevantes da retração para o projeto de estruturas de concreto obtêm-se próximo aos 90 dias, e que de fato, a avaliação temporal do termo  $K_2$ , proposto por Seara-Paz *et al.* (2016) e mostrada na Figura 86, demonstra que este tende ao valor unitário após 20 dias.

Figura 86 – Evolução do tempo  $K_2$  ao longo do tempo.

FONTE: Autora (2022).

Baseado na análise dos resultados experimentais e na proposta de Seara-Paz *et al.* (2016) foi proposto o novo coeficiente de correção ( $K_c$ ), conforme apresentado nas Equações 123 e 124. A retração por secagem ( $\varepsilon_{sh,code}$ ) determinada pelos modelos teórico é corrigida por  $\left(\frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,c,con}}\right)$  que é razão retração experimental/retração calculada em 90 dias e considera a porcentagem de agregado graúdo reciclado (RGA). A Tabela 65 apresenta os valores obtidos da relação retração teórica/retração experimental  $\left(\frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,t,con}}\right)$  para o concreto convencional em 90 dias.

Tabela 65 - Relação da retração teórica /retração experimental para concreto convencional.

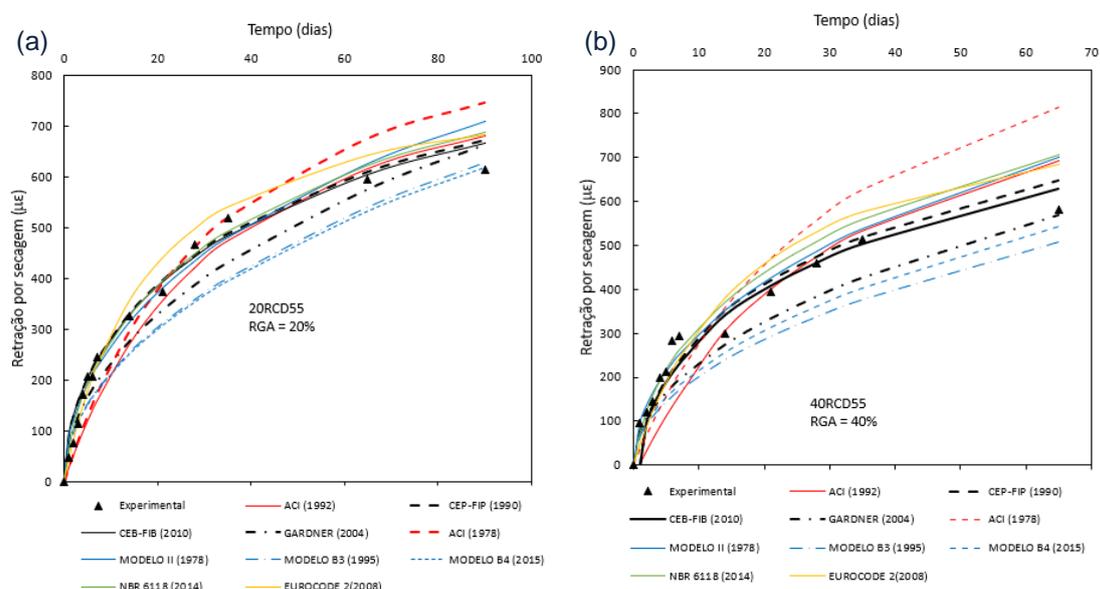
Misturas	$\frac{\varepsilon_{sh,e,con}}{\varepsilon_{sh,c,con}}$									
	ACI (1978)	ACI (1992)	CEB-FIP (1990)	CEB-FIP (2010)	GARDNER (2004)	MODELO II (1978)	MODELO B3 (1995)	MODELO B4 (2015)	NBR 6118 (2014)	EUROCODE 2 (2008)
REF55	0,68	1,26	1,53	1,86	2,67	0,94	3,66	4,86	1,04	1,39

FONTE: Autora (2022).

Os resultados obtidos na Tabela 65 mostram que o modelo da NBR 6118 (2014) e Modelo II (1978) mostram-se adequados para prever a retração do concreto convencional, o que corrobora com as análises estatísticas e as curvas teóricas geradas.

As curvas teóricas da retração por secagem ao longo do tempo para os concretos com agregado graúdo reciclado, após a aplicação do coeficiente de correção (Equação 123), são apresentados na Figura 87 (a) e (b).

Figura 87 – Previsão teórica da deformação por retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e 40RCD55 após a correção.



FONTE: Autora (2022).

Os resultados apresentados na Figuras 87 (a) e (b), após correções mostram que todas as curvas tendem a se aproximar do valor experimental. O Modelo II (1978) e a NBR 6118 (2014) mantiveram-se com uma boa aproximação dos valores experimentais após a correção, apresentando valores inferiores a 20% no coeficiente de erro e o coeficiente de desvio foram reduzidos após a correção.

As Tabelas 66, 67, 68 e 69 apresentam o coeficiente de erro M% e o coeficiente de desvio D%. Os valores teóricos calculados sem o coeficiente de correção (Tabelas 66 e 67) e após o coeficiente de correção (Tabela 68 e 69). O coeficiente de erro em geral foi reduzido para todos os modelos como observado nas Tabelas 66 e 68. No entanto, o modelo ACI (1978), modelo ACI (1992) e o Modelo B3 (1992) ainda apresentaram coeficiente de erro superior a 20% mesmo após a correção (Tabela 68), além de gerar valores inferiores aos dados experimentais.

Tabela 66 – Valores do coeficiente de Erro (%) para os modelos de previsão dos concretos com concretos AGR corrigidos.

Modelos	M (%)	
	20RCD55	40RCD55
ACI (1978)	27	31
ACI (1992)	31	34
CEB-FIP (1990)	35	38
CEB-FIB (2010)	44	47
GARDNER (2004)	59	62
MODELO II (1978)	10	14
MODELO B3 (1995)	68	71
MODELO B4 (2015)	73	74
NBR 6118 (2014)	14	16
EUROCODE 2 (2008)	28	32

FONTE: Autora (2022).

Tabela 67 – Valores do coeficiente de Desvio (%) para os modelos de previsão dos concretos com concretos AGR corrigidos.

Modelos	D (%)	
	20RCD55	40RCD55
ACI (1978)	9	6
ACI (1992)	-22	-24
CEB-FIP (1990)	-22	-25
CEB-FIB (2010)	-28	-31
GARDNER (2004)	-39	-41
MODELO II (1978)	-3	-8
MODELO B3 (1995)	-45	-47
MODELO B4 (2015)	-48	-49
NBR 6118 (2014)	-8	-11
EUROCODE 2 (2008)	-19	-22

FONTE: Autora (2022).

Tabela 68 – Valores do coeficiente de Erro (%) para os modelos de previsão dos concretos AGR corrigidos.

Modelos	M (%)	
	20RCD55	40RCD55
ACI (1978)	15	33
ACI (1992)	14	23
CEB-FIP (1990)	8	12
CEB-FIB (2010)	8	10
GARDNER (2004)	12	16
MODELO II (1978)	10	18
MODELO B3 (1995)	16	22
MODELO B4 (2015)	17	19
NBR 6118 (2014)	7	19
EUROCODE 2 (2008)	9	18

FONTE: Autora (2022).

Tabela 69 – Valores do coeficiente de Desvio (%) para os modelos de previsão dos concretos AGR corrigidos.

Modelos	D (%)	
	20RCD55	40RCD55
ACI (1978)	-2	6
ACI (1992)	-7	-4
CEB-FIP (1990)	3	4
CEB-FIB (2010)	3	2
GARDNER (2004)	-4	-8
MODELO II (1978)	2	6
MODELO B3 (1995)	-8	-14
MODELO B4 (2015)	-9	-11
NBR 6118 (2014)	2	6
EUROCODE 2 (2008)	3	3

FONTE: Autora (2022).

Os baixos valores do coeficiente de erro M% e do coeficiente de desvio D% das Tabelas 68 e 69 indicam que, uma vez conhecido o valor de retração experimental do concreto convencional, é possível estimar a retração por secagem do concreto com agregado graúdo reciclado utilizando o coeficiente de correção proposto. A correção proposta é simples e acessível a engenheiros com pouco conhecimento especializado sobre os detalhes da retração por secagem do concreto, sendo calibrado facilmente com testes de curto prazo. Novos estudos, possibilitará obter uma melhor calibração para a Equação 124, para que possa ser utilizado nos padrões de projeto para concreto armado contendo agregados graúdos reciclados.

A Tabela 70 apresenta um resumo dos resultados obtidos indicando os modelos considerados adequados para prever a retração do concreto com agregado graúdo após correção, conforme análise das curvas teóricas e a análise estatística desenvolvida. Foram considerados não adequados aqueles modelos mais distantes da curva teórica, que subestimam o valor experimental e que mesmo após a correção ainda apresentavam coeficiente de erro maior que 15% para qualquer das misturas.

Observa-se que os modelos CEB-FIP (1990) e CEB-FIB (2010) são considerados adequados para as misturas analisadas. O Modelo II (1978), NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2008) são adequados para as misturas com 20%RCC, não sendo adequados para 40% RCC.

Tabela 70 – Resultados dos modelos de previsão dos concretos corrigidos.

MODELOS	ANÁLISE 20RCD55	ANÁLISE 40RCD55
ACI (1978)	NÃO ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
ACI (1992)	NÃO ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
CEB-FIP (1990)	ADEQUADO	ADEQUADO
CEB-FIB (2010)	ADEQUADO	ADEQUADO
GARDNER (2004)	NÃO ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
MODELO II (1978)	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
MODELO B3 (1995)	NÃO ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
MODELO B4 (2015)	NÃO ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
NBR 6118 (2014)	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
EUROCODE 2 (2008)	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO

FONTE: Autora (2022).

#### 4.3.3.4 Proposta Modelo

Os resultados apresentados mostraram uma proposta de ajuste para os valores de retração dos concretos com agregado miúdo e graúdo reciclado, na qual é possível obter a curva teórica dos modelos através do coeficiente de correção  $K_c$ , determinado em função da relação valor experimental e numérico da retração aos 90 dias do concreto convencional. Apesar dos resultados adequados para alguns modelos, o ajuste depende de análise experimental do concreto convencional para determinação do  $K_c$  de acordo com a mistura analisada.

Uma nova proposta é desenvolvida para os concretos com agregado graúdo reciclado sem a necessidade de valores experimentais do concreto convencional, na qual é proposto um coeficiente fixo ( $Kr$ ) que corrige os modelos existentes para os concretos com agregado graúdo reciclado. Utilizou-se os valores teóricos obtidos nos modelos que apresentaram resultado adequado para o agregado graúdo reciclado e dados experimentais das misturas com agregado graúdo reciclado obtidos deste trabalho, bem como de dados obtidos na literatura (ANDRADE, 2018; AMÁRIO, 2019; BUTTLER, 2003; BRAVO *et al.* 2018), determinando um novo coeficiente  $Kr$  através da seguinte relação:

$$Kr = \frac{\varepsilon_{exp,rec}}{\varepsilon_{teórica,rec}} \quad (129)$$

Na qual  $\varepsilon_{exp,rec}$  é a retração do concreto com agregado graúdo reciclado aos 90 dias e  $\varepsilon_{teórica,rec}$  é o valor teórico obtido pelo modelo.

Observou-se uma variação dos valores obtidos para  $Kr$  conforme mostrado na Tabela 71.

Tabela 71 – Intervalo de variação dos coeficientes  $Kr$ .

Coeficiente	MODELOS ADEQUADOS				
	CEB-FIP (1990)	CEB-FIP (2010)	MODELO II (1978)	NBR 6118 (2014)	EUROCODE2 (2008)
$Kr$	1,89	1,09	0,63	0,93	0,67
	2,16	1,29	1,35	1,63	1,47

FONTE: Autora (2022).

Cabe ressaltar que o comportamento a retração do concreto depende da classe do concreto (resistência), concretos de alta resistência tendem a apresentar menor retração que os concretos de resistência normal. Desta forma, a sugestão do  $Kr$  baseou-se em concretos de resistência normal, na qual é necessário a realização de análise para obtenção do coeficiente  $Kr$  para concretos de alta resistência.

Obteve-se um valor fixo de coeficiente ( $Kr$ ) para cada modelo, gerando uma expressão para obtenção dos valores teóricos de retração do concreto com agregado

reciclado ( $\varepsilon_{sh}$ ) que depende do valor teórico obtido com o modelo ( $\varepsilon_{sh,code}$ ) e a porcentagem de agregado graúdo reciclado (RGA), conforme mostrado na equação 130 e na Tabela 72.

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} [K_r + 0,80 \cdot RGA] \quad (130)$$

Tabela 72 – Valores do coeficiente  $K_r$ .

Coeficiente	MODELOS ADEQUADOS				
	CEB-FIP (1990)	CEB-FIP (2010)	MODELO II (1978)	NBR 6118 (2014)	EUROCODE (2008)
$K_c$	1,50	1,55	1,04	0,99	1,26

FONTE: Autora (2022).

Desta forma, obtêm-se as equações 131, 132, 133, 134 e 135 para prevê a retração do concreto com agregado graúdo reciclado. Na equação 131, o valor de  $\varepsilon_{sh,code}$  é obtido pelas expressões do modelo CEB-FIP (1990), na equação 132 é obtido pelo modelo CEB-FIP (2010), na equação 133 pelo Modelo II (1978), na equação 134 pelo modelo da NBR 6118 (2014) e a equação 135 pelo Eurocode 2 (2008), conforme mostrado a seguir:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} [1,50 + 0,80 \cdot RGA] \quad (131)$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} [1,55 + 0,80 \cdot RGA] \quad (132)$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} [1,04 + 0,80 \cdot RGA] \quad (133)$$

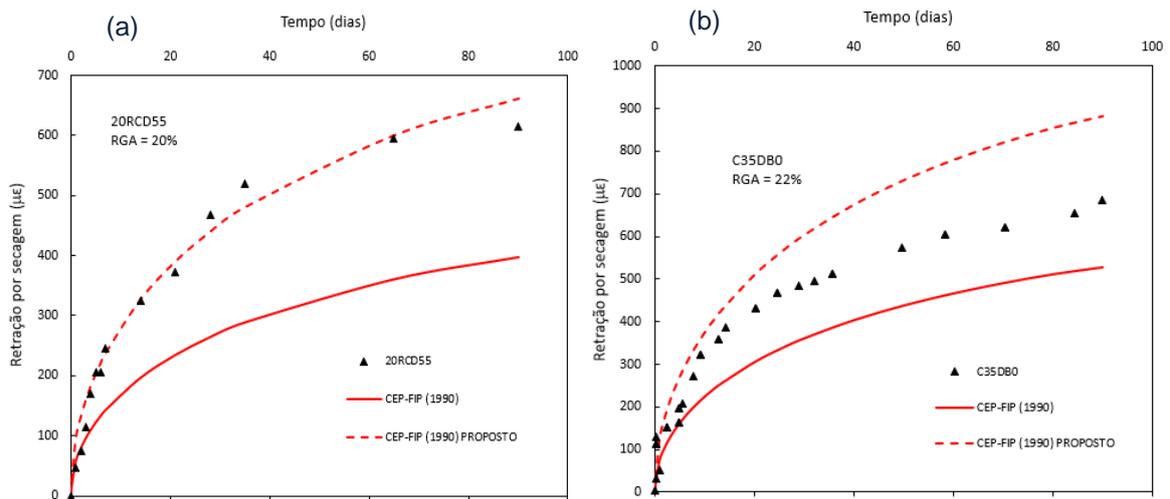
$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} [0,99 + 0,80 \cdot RGA] \quad (134)$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,code} [1,26 + 0,80 \cdot RGA] \quad (135)$$

As equações propostas são avaliadas comparando alguns resultados experimentais e as correspondentes previsões de retração. As Figuras 88, 89, 90, 91 e 92 mostram algumas das curvas teóricas gerada pelos modelos CEB-FIP (1990),

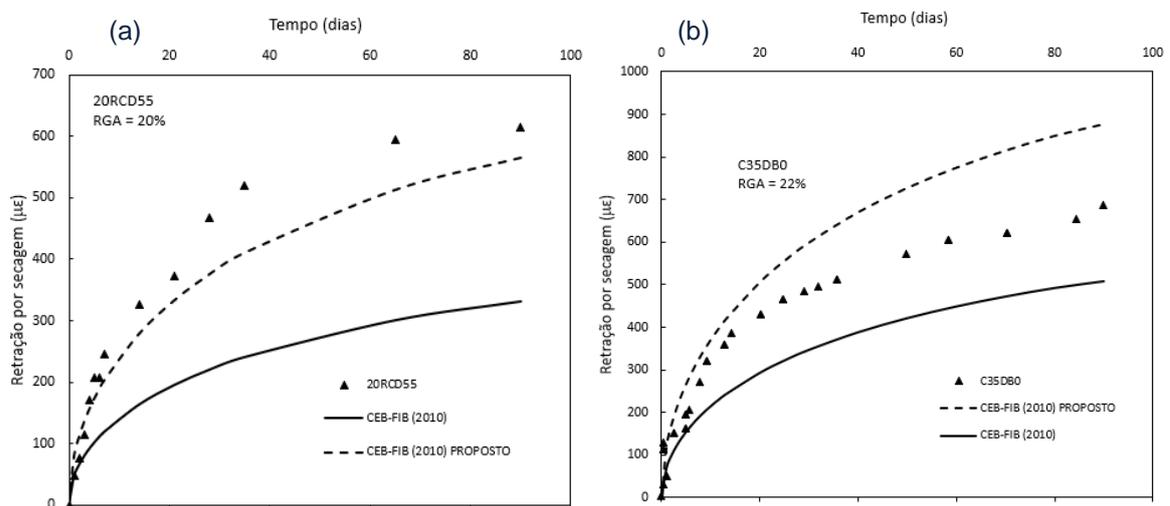
CEB-FIB (2010), Modelo II (1978), NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2008), respectivamente, e a curvas geradas pela nova proposta, comparando com os dados experimentais deste trabalho (a) e dados da literatura (b).

Figura 88 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo CEB-FIP (1990).



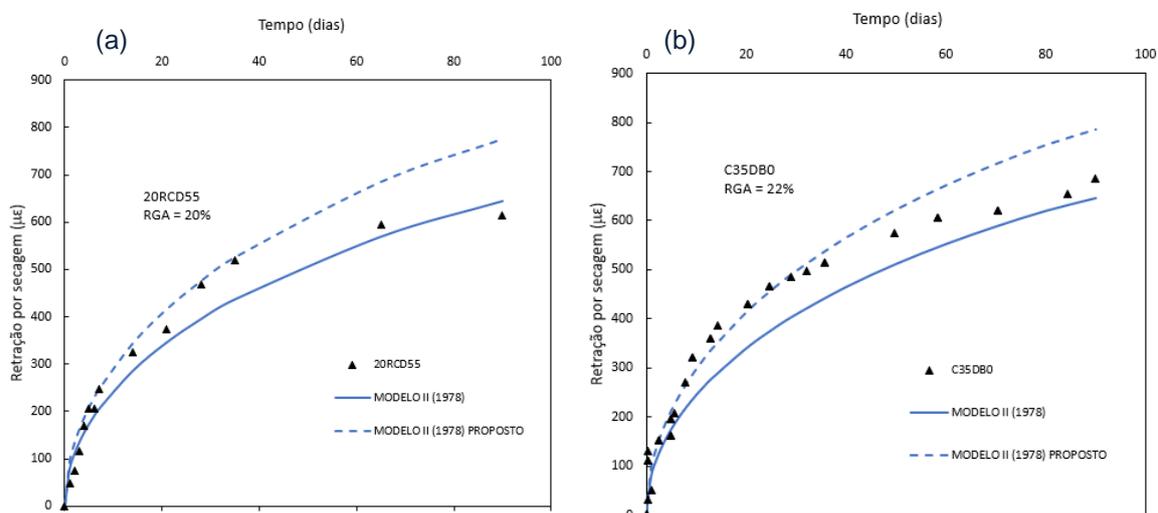
FONTE: Autora (2022).

Figura 89 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo CEB-FIB (2010).



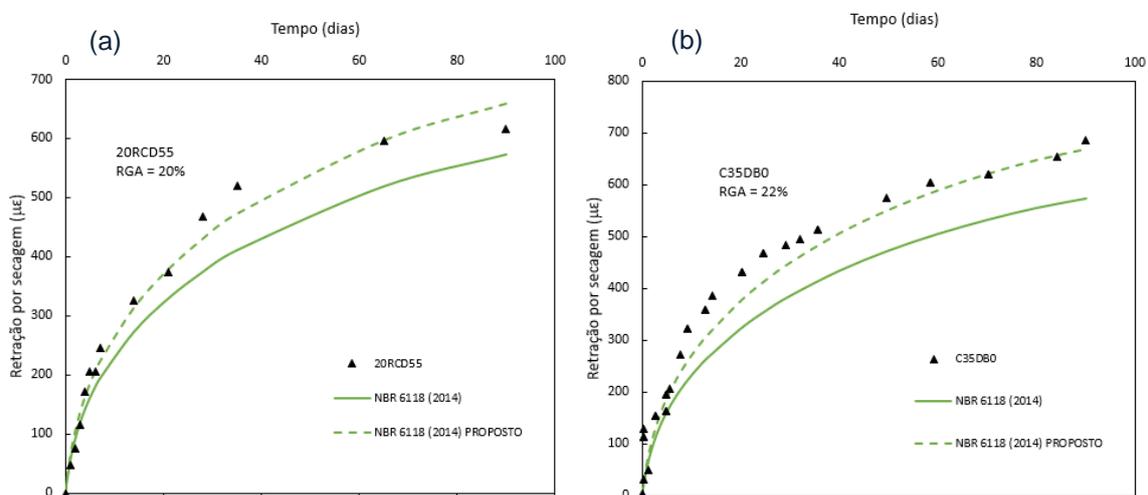
FONTE: Autora (2022).

Figura 90 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo Modelo II (1978).



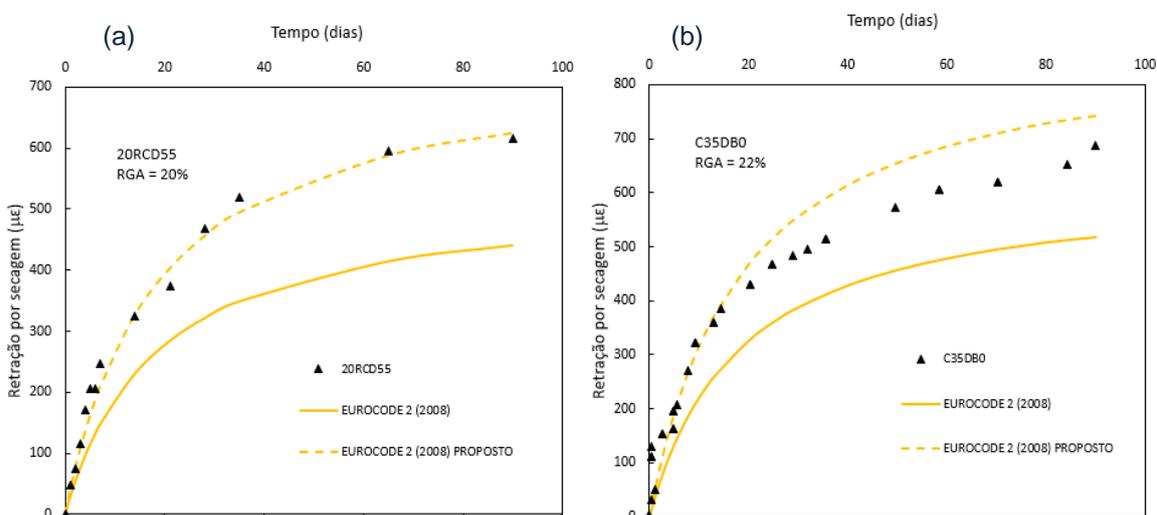
FONTE: Autora (2022).

Figura 91 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo NBR 6118 (2014).



FONTE: Autora (2022).

Figura 92 – Previsão teórica da retração ao longo do tempo dos concretos 20RCD55 e C35DB0 (AMÁRIO, 2019) com a nova proposta para o modelo Eurocode 2 (2008).



FONTE: Autora (2022).

A Figura 88 mostra que o modelo CEB-FIP (1990) apresenta valores de retração inferiores aos dados experimentais e com o novo modelo proposto a curva teórica gera maiores valores de retração se ajustando aos dados experimentais (Figura 88, a) ou mesmo apresentado valores superiores aos dados (Figura 88, b). Comportamento semelhante é observado no modelo CEB-FIP (2010), conforme Figura 89 (a) e (b).

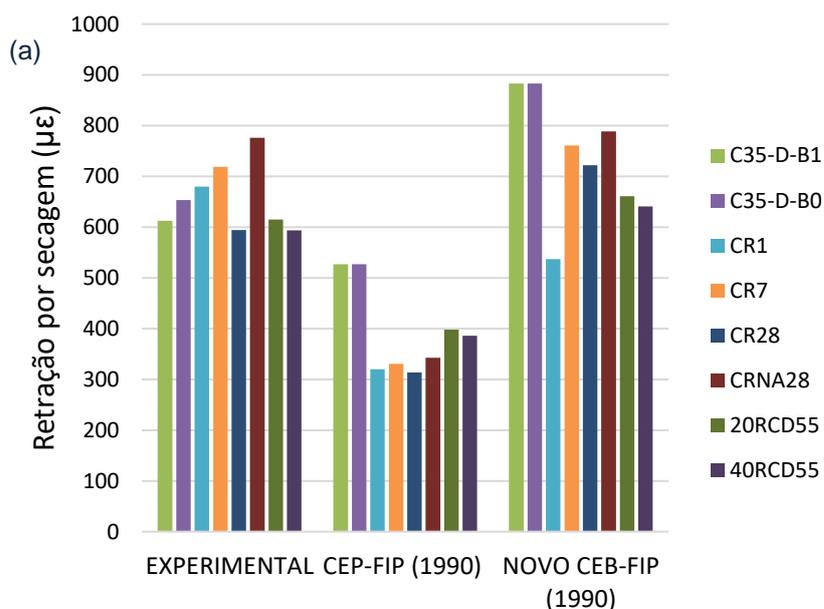
A Figura 90 mostra que o modelo II (1978) apresenta um bom ajuste a curva experimental, pois o mesmo tem em sua formulação os parâmetros da mistura para prever a retração do concreto, mas não considera a presença do agregado reciclado em suas expressões de previsão. Observa-se na Figura 90 (a) e (b) um aumento da curva teórica com o novo modelo proposto, ficando acima dos valores experimentais. A proposta para o modelo da NBR 6118 (2014), Figura 91 (a) e (b) mostra um bom ajuste aos valores experimentais, assim como para o Eurocode 2 (2008) (Figura 92, a, b).

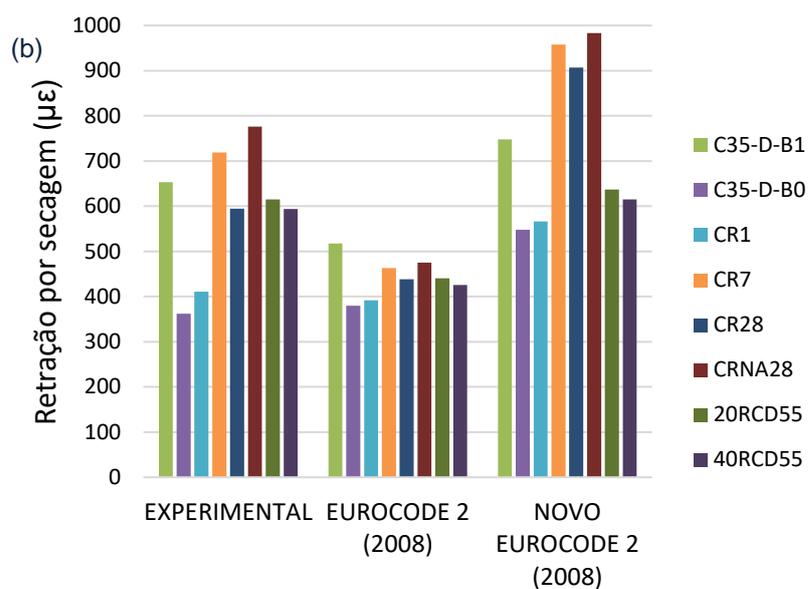
As Figuras 88, 89, 90, 91 e 92 mostram que a nova proposta se ajusta bem aos dados experimentais gerando uma curva maior do que o modelo original, comportamento que é esperado para os concretos com agregado reciclado, visto que a retração do concreto com agregado reciclado tende a ser maior do que nos concretos convencionais. O aumento da retração nos concretos com agregado reciclado é devido a presença do agregado reciclado que é mais poroso que o agregado natural decorrente

da presença de argamassa aderida ao mesmo. Os modelos propostos com a correção seguem essa ideia para prever a retração do concreto com agregado reciclado, pois considera a presença do agregado reciclado.

No entanto, dependendo do modelo e dos dados experimentais, os valores obtidos podem gerar curva teórica superiores aos valores experimentais. Os valores de retração aos 90 dias mostram que de forma geral a nova proposta determina a retração aos 90 dias superior aos dados experimentais, conforme ilustrado para os modelos CEB-FIP (1990) e Eurocode 2 (2008), na Figura 93 (a) e (b), respectivamente. Os outros modelos, conforme mostrado nas curvas teóricas, também seguem essa tendência.

Figura 93 – Retração por secagem de concretos com agregado graúdo reciclado (90 dias).





FONTE: Autora (2022).

Cabe destacar que, apesar dos resultados promissores do novo modelo que geram curvas teóricas que se ajustam melhor aos dados experimentais que o modelo original, é necessário um conjunto mais abrangente de dados experimentais para mostrar a validade mais ampla da metodologia proposta, e para examinar seu desempenho para a previsão da retração dos concretos com agregado graúdo reciclado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas as considerações finais dos resultados obtidos para os agregados, o concreto com agregado reciclado e a modelagem teórica da retração.

### 5.1 AGREGADOS

De acordo com os resultados apresentados dos agregados obtêm-se algumas conclusões:

- A caracterização dos materiais, sobretudo dos agregados reciclados foi fundamental para a definição de qual dos tipos de agregado reciclado, fornecido pela Águas Claras Ambiental, seria utilizado para a confecção dos concretos com agregado reciclado;
- Os resultados encontrados para a massa específica e absorção estão de acordo com a literatura, confirmando a forte correlação existente entre essas propriedades. A absorção e massa específica dos agregados reciclados estão diretamente relacionadas a sua porosidade, que é afetada pela presença de argamassa antiga aderida aos agregados naturais;
- A taxa de perda de abrasão LA está relacionada a qualidade do agregado, o resultado indica que a argamassa aderida ao agregado tem resistência ao desgaste superior ao do agregado natural;
- Conforme proposta disponível na literatura para classificar o agregado de acordo com suas propriedades (absorção de água, massa específica e abrasão LA), observou-se que a propriedade preponderante na redução da qualidade do agregado reciclado foi a absorção de água. O mesmo ocorreu na classificação proposta conforme teor de argamassa aderida e absorção. Desta forma, conforme propostas de classificação dos agregados para atestar a sua qualidade, conclui-se que a absorção pode ser considerado o principal parâmetro associado a qualidade do agregado reciclado;
- O método adotado para retirada da argamassa aderida não garante a quantificação total da argamassa aderida ao agregado, desta forma, o teor de argamassa aderida não é um parâmetro indicado para quantificar a qualidade do agregado reciclado. Sendo assim, os resultados corroboram que a absorção de água prevalece sobre a qualidade do agregado reciclado.

## 5.2 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

Conforme os resultados apresentados dos concretos com agregados reciclados obtêm-se algumas conclusões:

- Os resultados indicam que a cinza volante possibilita a redução da absorção de água por capilaridade;
- Os concretos com agregado graúdo reciclado apresentaram maiores valores de absorção por imersão, maior índice de vazios, menor massa específica e maior capilaridade que o concreto com agregado natural, pois o uso de agregado gera um concreto mais poroso. Quanto maior o teor de substituição por agregado reciclado, maior a absorção por imersão e índice de vazios;
- A presença de agregado reciclado gera pequenas variações nos valores de massa específica, o que indica que o uso de agregado reciclado tem pouca influência nessa propriedade;
- Após a retirada de argamassa aderida, há uma redução da absorção por capilaridade, da absorção por imersão e índice de vazios, mas os valores das misturas sem argamassa aderida ainda não se aproximam do concreto com agregado natural, o que indica ainda existir a presença de argamassa aderida;
- O uso de agregado reciclado tende a diminuir o módulo de elasticidade do concreto devido a fração mais deformável da argamassa antiga aderida ao agregado reciclado;
- A presença de agregado reciclado tende a reduzir a resistência à compressão, mas é possível obter concreto com agregado reciclado com resistência e módulo superior aos concretos com agregado natural;
- O uso de cinza volante nos concretos com agregado reciclado, para teores de 15% aumenta a resistência à compressão e módulo de elasticidade. No entanto, para teores de 30% há uma redução dos valores associados a essas propriedades;
- Alterando fatores a relação  $a/c$ , as próprias características do agregado reciclado, e até mesmo o projeto e procedimento de mistura, é possível obter concretos com agregado reciclado com deformação menor que a do concreto com agregado natural, ou seja, módulo de elasticidade maior;
- O uso de agregado reciclado geralmente aumenta a retração do concreto e quanto maior a relação água/cimento maior a retração;

- A utilização de cinza volante é capaz de reduzir a retração por secagem para valores inferiores ao do concreto com agregado natural. No entanto, ao aumentar o teor de cinza volante de 15% para 30% há um aumento na retração por secagem;
- É possível verificar que existe uma correlação linear entre a retração relativa e o teor de agregado reciclado utilizado nos concretos.

### 5.3 MODELAGEM TEÓRICA DA RETRAÇÃO

Segundo as análises apresentadas na modelagem teórica da retração por secagem dos concretos obtêm-se diversas conclusões. A seguir estão algumas considerações com relação a análise paramétrica realizada:

- Existem diversos modelos na literatura para predição da retração por secagem, inclusive que consideram parâmetros associados ao fenômeno da retração. No entanto, apesar de considerar parâmetros importantes para prever a retração do concreto, esses modelos não são capazes de prever a retração para diferentes concretos;
- Não existe um modelo que englobe os principais parâmetros que afetam a retração e que sejam representativos nos valores obtidos de retração;
- Muitos modelos consideram os parâmetros que afetam a retração, no entanto, os mesmos não têm influência significativa no valor da deformação, indicando não serem capazes de representar de forma adequada a retração por secagem, por não considerar de forma representativa os fatores que influenciam nos valores de retração;
- É necessário um modelo fácil de ser aplicado por engenheiros e que considere parâmetros que sejam capazes de descrever o comportamento a retração ao longo do tempo para diferentes concretos.

Verificou-se na análise paramétrica que os modelos não eram capazes de descrever de forma adequada o comportamento a retração para diferentes concretos. Desta forma, a análise estatística foi fundamental para quantificar o quanto esses modelos existentes eram adequados para prever a retração para diferentes concretos, inclusive com diferentes teores de agregado reciclado. A seguir são apresentadas algumas conclusões obtidas a partir dos resultados encontrados:

- Os resultados mostram que apesar de alguns modelos utilizarem os mesmos parâmetros, os mesmos apresentam comportamentos diferentes;
- De forma geral, os modelos tendem a apresentar valores inferiores aos dados experimentais, resultado que foi observado através da razão média e do coeficiente de desvio;
- O modelo Eurocode 2 (2008) apresentou resultados próximos aos experimentais para os concretos com agregado natural (C30 e C60);
- Nenhum dos modelos utilizados se mostrou adequado para prever o comportamento a retração do concreto com agregado miúdo reciclado para diferentes teores. O Modelo II (1978) apresentou valores inferiores aos experimental, mas foi o que mais se aproximou da curva para os concretos C3025 e C3050. O Modelo da NBR 6118 (2014) foi o que apresentou curvas mais próxima da curva experimental dos concretos C6025 e C6050;
- Na análise numérica realizada com agregado miúdo os modelos que apresentaram valores adequados aos 90 dias e mais homogêneos foram os modelos da NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2008) para os concretos C60. O Modelo II (1978) apresentou valores adequados para C30;
- As curvas teóricas que mais se aproximam dos valores experimentais dos concretos com agregado graúdo reciclado foram as obtidas pelos Modelos II (1978) e NBR 6118 (2014). Na análise numérica realizada com agregado graúdo os modelos que apresentaram valores aceitáveis aos 90 dias e mais homogêneos também foram o Modelo II (1978) e o da NBR 6118 (2014), como exceção das misturas com 40% de RGA;
- De forma geral, os modelos tendem a apresentar valores inferiores aos dados experimentais nos concretos com agregado miúdo reciclado, resultado que foi observado através da razão média e do coeficiente de desvio. Resultado semelhante é encontrado nos concretos com agregado graúdo reciclado, com exceção apenas do modelo ACI (1978), mas o mesmo apresenta valores não homogêneos;
- Os resultados indicam que a maioria dos modelos tendem a apresentar valores da retração inferiores aos dados experimentais e existe uma variação entre os valores determinados numericamente;

- Os resultados mostram que a proposta de Seara-Paz *et al.* (2016) não foi adequada para os dados experimentais em análise e que gerou resultados menos homogêneos após a correção, com valores menos uniformes;
- Após a correção proposta por Seara-Paz *et al.* (2016), todos os modelos com o concreto com agregado graúdo reciclado subestimam os valores experimentais;
- O coeficiente de variação indica que a maioria dos modelos analisados nas diferentes misturas tendem a apresentar valores não homogêneos, e que no geral após a correção proposta por Seara-Paz *et al.* (2016) houve um aumento nos desvios e coeficientes de variação. Apenas nos modelos ACI, nas misturas com agregado miúdo, os valores obtidos foram mais homogêneos após a correção. Nos concretos com agregado graúdo reciclado, apenas o Modelo II (1978) permaneceu com coeficiente de variação inferior a 25% após a correção;
- A proposta de Seara-Paz *et al.* (2016) não foi adequada para os dados experimentais em análise, tanto nos concretos com agregado miúdo reciclado como nos concretos com agregado graúdo reciclado, e gerou resultados menos homogêneos após a correção, com valores menos uniformes;
- Os modelos que apresentaram maior discrepância dos valores experimentais foram o Gardner (2004), Modelo B3 (1995) e Modelo B4 (2015);
- De forma geral as curvas teóricas possuem uma boa correlação com os valores experimentais, mas não são capazes de descrever de forma adequada os valores experimentais, sendo necessário ajustes com valores reais, com desenvolvimento de um modelo que seja capaz de considerar os parâmetros relacionados a retração do concreto com agregado reciclado, como o teor de agregado reciclado;
- A avaliação dos modelos teóricos modificados pelo fator de correção ( $K_c$ ) demonstrou uma boa aproximação dos resultados calculados com os resultados experimentais, verifica-se que há uma redução no erro após utilizar o coeficiente de correção para todos os modelos;
- Apesar da correção proposta aproximar as curvas teóricas dos valores experimentais dos concretos com agregado miúdo reciclado, alguns modelos ficaram

abaixo da curva experimental e ainda apresentaram coeficiente de erro maior que 20% sendo considerados não adequados. No concreto com agregado graúdo reciclado observou-se comportamento semelhante ao miúdo. No entanto, nas misturas com 20% de RGA todos os modelos após a correção apresentaram coeficiente de erro inferior a 20%;

- Os modelos considerados adequados para os concretos com agregado miúdo reciclado após correção proposta foram os modelos, CEB-FIP (1990), CEB-FIB (2010), NBR 6118 (2014) e EUROCODE 2 (2008);
- Os modelos considerados adequados para os concretos com agregado graúdo reciclado após correção proposta foram os modelos CEB-FIP (1990) e CEB-FIB (2010) para todas as misturas analisadas e o Modelo II (1978), NBR 6118 (2014) e EUROCODE 2 (2008) para as misturas com 20% AGR, não sendo adequados para 40% RGA;
- Verificou-se que conhecido o valor de retração experimental até 90 dias do concreto convencional é possível estimar a retração por secagem do concreto com agregado reciclado para os modelos indicados utilizando o coeficiente de correção proposto  $K_c$ ;
- A correção proposta é simples e acessível a engenheiros com pouco conhecimento especializado sobre os detalhes da retração por secagem do concreto, sendo calibrado facilmente com testes de curto prazo;
- Novos estudos, com um banco de dados maior, possibilitará obter uma melhor calibração das equações propostas para correção dos modelos viabilizando o uso dos mesmos nos padrões de projeto para concreto armado contendo agregados reciclados;
- A nova proposta para os modelos CEB-FIP (1990), CEB-FIB (2010), NBR 6118 (2014) e EUROCODE 2 (2008), considerando o agregado reciclado tende a aumentar a curva teórica obtida pelos modelos, este comportamento é esperado pois a retração tende a ser maior nos concretos com agregado reciclado que nos concretos com agregado natural;
- Novos estudos com um banco de dados maior possibilitarão estimar os valores de  $K_r$  de forma a prever a retração do concreto gerando valores de retração teóricos mais próximos dos valores experimentais, bem como outros valores

de  $K_r$  para diferentes concretos, como de alta resistência e utilizando agregados miúdos reciclados;

- O trabalho desenvolvido gerou propostas de correção para previsão da retração do concreto com agregado miúdo e graúdo reciclado, bem como novos modelos que possibilitam prever a retração do concreto com agregado graúdo reciclado. As correções e modelos propostos levam em consideração a presença de agregado reciclado e seu efeito nas curvas teóricas para previsão da retração, sendo a principal contribuição original os novos aspectos considerados nas formulações propostas para a previsão da retração dos concretos com agregado reciclado.

## REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE. **ACI E-701** : Aggregates for concrete. Aci education bulletin e1-07, materials for concrete construction. EUA, 2007.

ACI. ACI committee 209: Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete. **ACI Report 209.2R-08**, Farmington Hills, 2008.

AFROUGHSAKET, V.; BIOLZI, L.; OZBAKKALOGLU, T. Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. **Composite Structures**. v. 181, 273–284, 2017.

AHMADI, M.; FARZIN, S.; HASSANI, A.; MOTAMEDI, M. Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and Aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 144, 392–398, 2017.

AILI, A.; VANDAMME, M.; TORRENTI, J. M.; MASSON, B . Is long-term autogenous shrinkage a creep phenomenon induced by capillary effects due to self-desiccation? **Cement and Concrete Research**. 108, 186–200, 2018.

AKÇA, K.R; ÇAKIR, O; IPEK, M. Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled Aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 98, 620–630, 2015.

AL-SALEH, S. A. Comparison of theoretical and experimental shrinkage in concrete. **Construction and Building Materials**. 72, 326–332, 2014.

ALVES, M. M. **Análise e comparação de modelos de previsão de fluência e retração entre as normas CEB/90, CEB/78 e NBR6118**. Revista Especialize On-line IPOG . Ano 8, Edição nº 14, Vol. 01, dezembro. Goiânia, 2017.

AMARAL, J. C. **Tensões originadas pela retração em elementos de concreto com deformação restringida considerando-se o efeito da fluência**. Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2011.

AMER, A. A. M.; EZZIANE, K.; BOUGARA, A.; ADJOURD, M. Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 123, 300–308, 2016.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C 157/C 157M – 08**. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. 2008.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C512 / C512M**. Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. Philadelphia, 2002.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C 596 – 01**. Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209. 1R-05**. Chapter 2: Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete, 2005.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION – ACPA. **Recycling Concrete Pavements - Engineering Bulletin**. Skokie, IL, 2009.

AMARIO, M. **Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

AMARIO, M.; RANGEL, C.S.; PEPE, M.; DIAS, R.; FILHO, T. Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model. **Cement and Concrete Composites**. v. 84; 83-92, 2017.

AMARIO, M. **Propriedades do estado fresco e de longa duração de concretos de resistência normal e alto desempenho contendo agregados de resíduo de concreto de diferentes origens**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

ANDRADE, G. P. **Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado miúdo de resíduo de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

ANDRADE, G.P.; POLISSENI, G.C.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R.D. Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model. **Construction and Building Materials**. v 252:119091, 2020.

ANN, K.Y.; MOON, H.Y.; KIM, Y.B.; RYOU, J. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*. v. 28,993–999, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15114**. Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-6118**. Projeto de estruturas de concreto -Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR-15575-1**. Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 51**. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2001.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas**. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 2004.

BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, K.; PAREEK, V. K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 9, 109-126, 1993.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: **Durabilidade do Concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1ª Edição – Editora IBRACON. São Paulo, 2014.

BAZANT, Z. P. Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future. **Nuclear Engineering and Design**. v. 203, 27–38, 2001.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 1999.

BENTUR, Arnon. Role of interfaces in controlling durability of fiber-reinforced ciments. **Journal of materials in civil engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 12, n. 1, p. 2–7, 2000.

BENTUR, A. Introduction: Overview of early age cracking. RILEM report 25: Early Age Cracking in Cementitious Systems, RILEM TC 181 – EAS. 2002.

BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. **Cement and Concrete Composites**. 26, 677–685, 2004.

BENTZ, 2006. Influence of shrinkage-reducing admixtures on early-age properties of cement pastes. **Journal of Advanced Concrete Technology**. 4 (3), pp. 423-429, 2006.

BRAGA, A. M.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**. v 162, 529-543, 2017.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002**. Diário Oficial da República Federal do Brasil, 2002.

BRAVO, M.; BRITO, J.; PONTES, J. EVANGELISTA, L. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. **Construction and Building Materials**. v. 77, 357–369, 2015.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; PACHECO, J. Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. **Construction and Building Materials**. v. 168, 818–830, 2018.

BROOKS, J.J. 30-year creep and shrinkage of concrete. **Magazine of Concrete Research**. v.57(9), 545-556, 2005.

BUI, N. K.; SATOMI, T.; TAKAHASHI, H. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 163, 496–507, 2018.

BUTLER, A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto –influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. São Carlos 2003. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; B,1, TIGHE, S. L. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. **Construction and Building Materials**. v. 47, 1292–1301, 2013.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; MOLIN, D. C. C. D.; RIBEIRO, J. L. D. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. v. 24, 421-430, 2010.

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

CCAA. **Use of recycled aggregates in construction**. **Cement Concrete & Aggregates**. Austrália, 2008.

CEB (COMITE EURO - INTERNATIONAL DU BETON). **CEB – FIP MODEL CODE 1990** - Design Code, 1990.

CEOLIN, E. D.; LIBRELOTTO, L. I. **Durabilidade e sustentabilidade**: análise a partir da Norma de Desempenho. 5º SICS Seminário Internacional de Construções Sustentáveis / 2º Fórum Desempenho das Edificações, 2016.

CHANDRA, S. **Waste materials used in concrete manufacturing**. [S.l.]: Elsevier, 1997.

CHATVEERA, B. ; LERTWATTANARUK, P. **Durability of conventional concretes containing black rice husk ash**. **Journal of environmental management**, Elsevier, v. 92, n. 1, 2011.

CEN. Comité Européen de Normalizations (CEN) - **EN-1992-1-1**, Eurocode 2 – Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules for buildings. Belgium, 2008.

COUTINHO, J.S. **Improvement of the durability of concrete by treatment of the moulding**. PhD Thesis. Faculty of Engineering, University of Porto. Portugal, 1998, 396 p.

DAS, C. S.; DEY, T.; DANDAPAT, R.; MUKHARJEE, B. B.; KUMAR, J. Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. 189, 649–659, 2018.

DEBOODT, T.; FU, T.; IDEKER, J. H. Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete. **Construction and Building Materials**. 119, 53–60, 2016.

DE BRITO, J.; FERREIRA, J. ; PACHECO, J. ; SOARES, D.; GUERREIRO, M. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**. v. 6, 1–16, 2016.

DODDS, W.; GOODIER, C.; CHRISTODOULOU, C.; AUSTIN, S.; DUNNE, D. Durability performance of sustainable structural concrete: Effect of coarse crushed concrete aggregate on microstructure and water ingress. **Construction and Building Materials**. v. 145, 183–195, 2017.

DONG, J.F.; WANG, Q.Y.; GUAN, Z.W., Structural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tube columns strengthened by CFRP. **Engineering Structures**. v. 48, 532–542, 2013.

DUART, M. **Modificação da porosidade em concretos com adição mineral de cinza de casca de arroz**. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, 2011.

DINAKAR, P.; REDDY, M.K.; SHARMA, M. Behaviour of self-compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash. **Mater Des, Technical Report**. 46, 609–16, 2013.

DINIZ, J.Z.F; FERNANDES, J.F; KUPERMAN, S.C. **Retração e fluência. Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), v. 1, p. 672–703, 2011.

ESPING, O. **Early age properties of self-compacting concrete – Effects of fine aggregate and limestone filler**. Thesis - Department of Civil and Environmental Engineering Building Technology Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden 2007.

ETXEBERRIA, M.; MARI, A.; VAZQUEZ, E. Recycled aggregate concrete as structural material. **Materials and Structures**. v.40, 529-541, 2007.

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

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**. v. 32, 9–14, 2010.

FATHIFAZL, G. ; RAZAQPUR, A. G.; BURKAN ISGOR, O.; ABBAS, A.; FOURNIER, B.; FOO, S. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. **Cement & Concrete Composites**. v 33, 1026–1037, 2011.

FERREIRA, L. M. M. **Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão**. Influência da pré-saturação. Dissertação Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2007.

FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**. v. 63(8), 617–627, 2011.

FIB. International Federation for Structural Concrete. **FIB Model Code for Concrete Structures, 2010**. Fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete (FIB). Germany, 2013.

GAO, D.; ZHANG, L.; NOKKEN, M. Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear. **Cement and Concrete Composites**. v. 79, 1- 8, 2017.

GARDNER, N. J. **Comparison of prediction provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concretes**. NRC Canadá, v. 31, p. 767–775, 2004.

GEDAM, B.A.; UPADHYAY, A.; BHANDARI, N.M. **An apt material model to predict creep and shrinkage behavior of HPC concrete**. In: Third international Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies set for Kyoto, 2010.

GENG, Y.; WANG, Y.; CHEN, J. Creep behaviour of concrete using recycled coarse aggregates obtained from source concrete with different strengths. **Construction and Building Materials**. v. 128, 199–213, 2016.

GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates. **Engineering Structures**. v. 157, 224–234, 2018.

GILBERT, R. I.; RANZI, G. **Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures**. Spon Press, 2011.

GONÇALVES, P. **Betão com agregados reciclados. Análise comentada da legislação existente**. Dissertação (Mestrado para Engenharia Civil) — Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

GOEL R.; KUMAR, R.; PAUL, D. K. Comparative Study of Various Creep and Shrinkage Prediction Models for Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 19(3): 249-260, 2007.

GOLAFSHANI, E. M.; BEHNOOD, A. Automatic regression methods for formulation of elastic modulus of recycled aggregate concrete. **Applied Soft Computing**. v. 64, 377–400, 2018.

GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M. Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete. **Construction and Building Materials**. v.. 115, 32–41, 2016.

GONZÁLEZ, F.; FARJADO, G.; ARLIGUIE, G., JUÁREZ, C.A., ESCADEILLAS, G. Electrochemical Realkalization of Carbonated Concrete: an Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion. **International Journal of Electrochemical Science**. p. 6332-6349, 2011.

HABEEB, G. A.; FAYYADH, M. M. Rice husk ash concrete: the effect of rha average particle size on mechanical properties and drying shrinkage. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 3, n. 3, p. 1616–1622, 2009.

HANAI, J.B. **Fundamentos do Concreto Protendido**. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Estruturas, 2005.

HANUMESH, B. M.; HARISH, B. A.; VENKATA R. N. Influence of Polypropylene Fibres on Recycled Aggregate Concrete. **Materials Today: Proceedings** 5. 1147–1155, 2018.

HAYLES, M.; SANCHEZ, L. F.M.; NOËL, M. Eco-efficient low cement recycled concrete aggregate mixtures for structural applications. **Construction and Building Materials**. v. 169,724–732, 2018.

HELENE, P; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. IBRACON. p.905-944. São Paulo, 2010.

HOLT, E. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. **Cement and Concrete Research**. 35, 464 – 472, 2005.

JENSEN, O. M.; LURA, P. Techniques and materials for internal water curing of concrete. **Materials and Structures**. 39, 817–825, 2006.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. **Cement and Concrete Research**. vol. 25, n. 7, pp. 1457-1468, 1995.

HUA, C.; EHRLACHER, A.; ACKER, P. Acker. Analyses and models of the autogenous shrinkage of Hardening cement paste li. Modelling at scale of hydrating grains. **Cement and Concrete Research**. vol. 27, No. 2, pp. 245-258, 1997.

HUBLER, M. H.; WENDNER, R.; BAŽANT, Z. P. Comprehensive Database for Concrete Creep and Shrinkage: Analysis and Recommendations for Testing and Recording. **ACI Materials Journal**. V. 112, No. 4, July-August, 2015a.

HUBLER, M. H.; WENDNER, R.; BAŽANT, Z. P. Statistical justification of Model B4 for drying and autogenous shrinkage of concrete and comparisons to other models. **Materials and Structures**. 48:797–814, 2015b.

ISAIA, Geraldo Cechella et al. **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural**. parte i: propriedades mecânicas e microestrutura. *Ambiente Construído*, v. 10, n. 1, p. 121–137, 2010.

JI, T.; ZHANG, B.; ZHUANG, Y.; WU, H. Effect of Lightweight Aggregate on Early-Age Autogenous Shrinkage of Concrete. **ACI Materials Journal**. 2015.

JOHN, V. M.; ÂNGULO, S. C., 2003, **Metodologia para o desenvolvimento de reciclagem de resíduos**. In: JOHN, V. M.; ROCHA, J. C., *Utilização de resíduos na construção habitacional - Coletânea Habitar- ANTAC*, v. 4. Porto Alegre, 2003.

JORDANI, B. **Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna em concreto com cinza de casca de arroz**. Dissertação mestrado – Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. São Leopoldo, 2016.

KATAOKA, L. T. **Análise da deformabilidade por fluência e retração e sua utilização na monitoração de pilares**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia e Estruturas e Geotecnia. São Paulo, 2010.

KATKHUDA, H.; SHATARAT, N. Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment. **Construction and Building Materials**. 140, 328–335, 2017.

KWAN W. H.; RAMLI, M. KAM, K. J.; SULIEMAN M. Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 565-573, 2012.

KOU, S.; POON, C.; AGRELA, F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. **Cement & Concrete Composites**. v. 33, 788–795, 2011.

KOU, Shi-Cong; POON, C. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 37, p. 12–19, 2013.

KOVLER, K.; ZHUTOVSKY, S. Overview and future trends of shrinkage research. **Materials and Structures**. v. 39, 827–847, 2006.

KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J.D. Influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. **Cement and Concrete Composites**. v.84,198-213, 2017.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa Pós-graduação em engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEITE, M. B.; FIGUEIREDO FILHO, J.G. L.; LIMA, P. R. L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. **Materials and Structure**, v.46, n.10, p.1765-1778, 2013.

LEITE, M.B.; MONTEIRO, P.J.M.; Microstructural analysis of recycled concrete using X ray microtomography. **Cement and Concrete Research**. v. 81, p. 38-48, 2016.

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**. v. 27, 439–449, 2012.

LIU, Q.; XIAO, J.; SUN, Z. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 41, 1050–1057, 2011.

LIU, X.; YAN, M.; GALO BARDES, I.; SIKORA, K. Assessing the potential of functionally graded concrete using fibre reinforced and recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. v. 171, 793–801, 2018.

LOTFY, A.; AL-FAYEZ, M. Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. **Cement & Concrete Composites**. v. 61, 36–43, 2015.

LOTHENBACH, B. ; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

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

LURA, P.; PEASE, B.; MAZZOTTA, G.B.; RAJABIPOUR, F.; WEISS, J. Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks. **ACI Materials Journal**. V. 104 (2),. 187-194, 2007.

- LV, Z.; LIU, C.; ZHU, C.; BAI, G.; QI, H. 5.3.1 Experimental Study on a Prediction Model of the Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate Concrete. **Applied Sciences**. 9, 4322, 2019.
- MANZI, S.; MAZZOTTI, C.; BIGNOZZI, M.C. Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. **Cement & Concrete Composites**. v. 37, 312–318, 2013.
- MANGAT, P. S.; MOTAMEDI, A. M. Shrinkage of steel fibre reinforced cement composites. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**. v.21,163-171, 1988.
- MATIAS, D.; BRITO, J.; ROSA, A. PEDRO, D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. **Construction and Building Materials**. v. 44, p. 101-109, 2013.
- MAZZUCCO, G.; XOTTA, G.; POMARO, B.; SALOMONI, V.A; FALESCHINI, F. Elastoplastic-damaged meso-scale modelling of concrete with recycled Aggregates. **Composites** . v. 140, 145–156, 2018.
- MCGINNIS, M. J.; DAVIS, M.; DE LA ROSA, A.; WELDON, B. D.; KURAMA, Y. C. Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 154, 258–269, 2017.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MUNHOZ, G. S.; MEDEIROS, M. H. F. Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana. **Revista ALCONPAT - Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción**. v. 9, Número 2, 152 – 166, 2019.
- MEDINA, C.; ZHU, W.; HOWIND, T.; ROJAS, M. I. S.; FRÍAS, M. Influence of mixed recycled aggregate on the physical e mechanical properties of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 68, 216-225, 2014.
- MEDJIGBODO, S.; BENDIMERAD, A. Z.; ROZIERE, E.; LOUKILI, A. How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties? **Cement and Concrete Composites**. v. 86, 72-86, 2018.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª ed.IBRACON, 2014.
- MENDOZA-RANGEL, J. A.; CANUL , E. I.; MORENO, J. M.. Efeito de cinzas volantes nas propriedades mecânicas de concreto feitos com agregado calcário moído de alta absorção. **Revista ALCONPAT**, Volumen 6, Número 3, 235 – 247, 2016.

MERLET, J. D.; Pimienta, P. **Mechanical and physical-chemical properties of concrete produced with coarse and fine recycled aggregates.** In Third International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Odense, Denmark, pp. 343–353, 1993.

MIETZ, J. **Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures - a state of the art report.** European Federation of Corrosion Publications. London, England, 1998.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75 µm on mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 20, pp. 615-624, 2006.

MORA-RUACHO, J.; GETTU, R. ; AGUADO, A. Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 39, 141–146, 2009.

MUELLER, A.; SCHNELL, A.; K. RUEBNER. The manufacture of lightweight aggregates from recycled masonry rubble. **Construction and Building Materials**. v. 98, 376–387, 2015.

NITA, C.; JOHN, V.M.; DIAS, C.M.R.; JUNIOR, H.S.; TAKEASHI, M.S. **Effect of metakaolin on the performance of pva and cellulose fibers reinforced cement.** 9th International Inorganic Bonded Wood and Fiber Vancouver, 2004.

NUNES, N.L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração do concreto de cimento Portland.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. ISSN 0103-9830, BT/PCC/452. São Paulo: EPUSP, 2007.

OLORUNSOGO, F.T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**. v 32, 179–185, 2002.

OMARY, S.; GHORBEL, E.; WARDEH, G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. **Construction and Building Materials**. v. 108,163–174, 2016.

ONGHERO, L. **Combate à retração e fissuração em concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de vidro.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

ORDÓÑEZ, S. T. L. **Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com Adição de Polímeros Superabsorventes e Aditivo Redutor de Retração.** Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Distrito Federal, 2013.

PADMINI, A. K., RAMAMURTHY, K., MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. v. 23, 829-836, 2009.

PANDURANGAN, K., DAYANITHY, A., PRAKASH, S.O. "Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete". **Construction and Building Materials**. v.120, 212-221, 2016.

PAUL, S. C.; PANDA, B. ; GARG, A. A novel approach in modelling of concrete made with recycled aggregates. **Measurement** . v 115, 64–72, 2018.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. **Construction and Building Materials**. v 71,141–151, 2014.

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

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement. **Construction and Building Materials**. v 147, 803–814, 2017a.

PELISSER, F.; SANTOS NETO, A. B. S.; LA ROVERE, H. L.; PINTO, R. C. A. Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. **Construction and Building Materials**. v. 24, 2171–2176, 2010.

PEPE, M.; KOENDERS, E.A.B.; FAELLA, C.; MARTINELLI, E. Structural concrete made with recycled aggregates: Hydration process and compressive strength models. **Mechanics Research Communications**. v. 58, 139–145, 2014.

PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A.B.; MARTINELLI, E. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. **Construction and Building Materials**. v. 69 ,124–132, 2014a.

PEPE, M. **A conceptual model to design recycled aggregate concrete for structural applications**. Tese (Doutorado) — Universita degli studi di Salerno, Salerno, Italia, 2014.b

PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A.B.; MARTINELLI, E. A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete. **Construction and Building Materials**. V.122, 362–372, 2016.

PINTO, S. R.; MACEDO, A. L. A.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Effect of preconditioning temperature on the water absorption of concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. V.3(3), 1-10, 2018.

PONS, G.; TORRENTI, J. Retração e fluência. In: **Durabilidade do Concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1ª Edição – Editora IBRACON. São Paulo, 2014.

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

POON, C.; CHAN, D. Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 21, 164-175, 2007.

PUTHUSSERY, J. V.; KUMAR, R.; GARG, A. Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. **Waste Management**. v. 60, 270–276, 2017.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**. v.42, 407-415, 2007.

RAHMANI, T. KIANI, B. BAKHSHI, M. SHEKARCHIZADEH, M. **Application of Different Fibers to Reduce Plastic Shrinkage Cracking of Concrete**. RILEM Bookseries. January 2012.

RANGEL, C. S. **Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

RANGEL, C.S.; AMARIO, M.; PEPE, M.; YAO, Y.; MOBASHER, B.; T. FILHO, R. DIAS. Tension stiffening approach for interface characterization in recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 82, 176-189, 2017.

RANGEL, C.S.; T. FILHO, R. DIAS.; AMARIO, M.; PEPE, M.; POLISSENI, G.C.; ANDRADE, G.P. **Journal of Cleaner Production**. Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study. v. 208, 589-601, 2019.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 50, 71-81, 2007.

RAY, Indrajit et al. Shrinkage and cracking studies of high performance concrete for bridge decks. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 244–254, 2012.

RECENA, F. A. P. **Retração do Concreto**. EDIPUCRS – Editora Universitária da PU-CRS. Porto Alegre, 2014.

REIS, C. N. S. **Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana. Bahia, 2009.

REPETTE, W.L. **Concretos de última geração: presente e futuro**. In: ISAIA, G.C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. Instituto Brasileiro do Concreto. Seção VIII, Cap.49, v.2. São Paulo, 2005.

RILEM TC 121-DRG. Specifications for Concrete with Recycled Aggregates. **Materials and Structures**. v.27, 557-559, 1994.

RILEM 107-IGCS. Measurement of time-dependent strains of concrete. **Materials and Structures**. v. 28, p. 357–365, 1995.

RILEM TC 242-MDC. (chair: Bažant, z. p.): Rilem draft recommendation: Tc-242-mdc multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis. model b4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability. **Materials and Structures**, v. 48, p. 753–770, 2015.

RODRIGUES, F.; CARVALHO, M. T.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**. v. 52, 438-445, 2013.

RODRIGUES, G. S. S. **Contribuição ao Estudo da Retração e da Fluência e seus Mecanismos de Atuação a Baixas Idades em Concretos Estruturais**. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Distrito Federal, 2010.

SOLÍS-CARCAÑO, R.; MORENO, E. E. I. Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. **Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.** v. 21, 57–68, 2006.

SAFIUDDIN, MD.; ALENGARAM, U. J.; SALAMB, MD. A. Properties of High- Workability Concrete with Recycled Concrete Aggregate. **Materials Research**, v. 14, n. 2, p. 248-255, 2011.

SARAVANAKUMAR, P.; ABHIRAM, K.; MANOJ, B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. **Construction and Building Materials**. v 111, 611–617, 2016.

SANCHEZ, M. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural**. Tese de Doutorado – Universidade Politécnica de Madri. Madri, 2004.

SANTOS, A. A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, Bahia, 2016.

SANTOS, D. O. J.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. **Revista Matéria**. v.22, n.1, 2017.

SAYAH, F.; EMBORGA, M.; HEDLUNDA, H. **Plastic Shrinkage Cracking in Concrete – Influence of Test Methods**. 2nd International RILEM/COST - Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures - EAC2 12–14, ULB-VUB, Brussels, Belgium. September, 2017.

SEARA-PAZ, S.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; GONZÁLEZ-TABOADA, I. Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage. **Construction and Building Materials**. 122, 95–109, 2016.

SHAN, H.; XU, J.; WANG, Z.; JIANG, L.; XU, N. Electrochemical chloride removal in reinforced concrete structures: Improvement of effectiveness by simultaneous migration of silicate ion. **Construction and Building Materials**. 127, 2016.

SILVA, F. G. S.; DANTAS, A. B. **Técnicas de Medida da Retração Autógena em Concretos de Alto Desempenho (CAD's)**. In: Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2005, São José dos Campos. São José dos Campos: JAC Gráfica e Editora, 2005.

SILVA, P. R.; BRITO, J. Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Construction and Building Materials**. v. 86, 101–112, 2015.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**. v. 65, 201–217, 2014.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. **Construction and Building Materials**. V. 77, 327–339, 2015a.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R.K. Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. 83, 108–118, 2015b.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R.K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 112, 2171-2186, 2016.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management** . v.31, 2352–2360, 2011.

SHEN, D.; JIANG, J.; SHEN, J.; YAO, P.; JIANG, G. Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age. **Construction and Building Materials**. 103, 67–76, 2016.

SNOECK D.; JENSEN, O.M.; DE BELIE, N. The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**. 74, 59–67, 2015.

TAM, V.W.Y.; GAO, X.F.; TAM, C.M. Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**. v.35, n. 6, 1195-1203, 2005.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. **Journal of Materials Science**. v. 42, 3592–3602, 2007.

TAM, V. W.Y.; KOTRAYOTHAR, D.; XIAO, J. Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**. v. 100, 262–272, 2015.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**. v.172, 272–292, 2018.

TAVARES, L. R. C. **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials. **Magazine of Concrete Research**. v. 49, No. 178, 15-22, 1997.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2007.

TOLEDO FILHO, R.D.; GHAVAMI, K. ; SANJUÁN, M.A. ; ENGLAND, G.L. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Composites**. 27, 537–546, 2005.

TOLEDO FILHO, R.D.; KOENDERS, E.A.B.; PEPE, M.; CORDEIRO, G.C.; FAIRBAIRN, E.M.R.; MARTINELLI, E. . Rio 2016 sustainable construction commitments lead to new developments in recycled aggregate concrete. **Proceedings of the ICE – Civil Engineering**. 166, 2013.

UEPG. **European Aggregates Association – Annual Review (2017–2018)**, 2018.

UEPG. **European Aggregates Association – Annual Review (2019–2020)**, 2020.

VÁZQUEZ, E; HENDRIKS, Ch F; JANSSEN, GMT. **Draft of spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete**. In: RILEM

PUBLICATIONS SARL. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. Espanha, 2004. p. 511–525.

VERIAN, K.P., WHITING, N.M., JITENDRA, J., OLEK, J., SNYDER, M.B. **Using Recycled Concrete as Aggregate in Concrete Pavements to Reduce Materials Cost.** Publication Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation (INDOT) and Purdue University, West Lafayette, Indiana.. 2013.

VERIAN, K. P.; ASHRAFB, W.; CAOC, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation & Recycling.** v. 133, 30–49, 2018.

VINKLER, M.; VÍTEK, J. Drying shrinkage of concrete elements. **Structural Concrete.** 18, 92–103. 2017.

WBTC. WBTC N°. 12/2012: **Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates.** Works Bureau Technical Circular Hong-Kong, 2012.

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

WIJAYASUNDARA, M.; MENDIS, P.; CRAWFORD, R. H. Integrated assessment of the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. **Journal of Cleaner Production.** v. 174, 591-604, 2018.

WU, L.; FARZADNIA, N.; SHI, C.; ZHANG, Z.; WANG, H. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. **Construction and Building Materials.** 149, 62–75, 2017.

YEHIA, S.; ABDEL FATAH, A..Examining the variability of recycled concrete aggregate properties. **International Conference on Civil Architecture and Sustainable Development (CASD).** 57–60, 2016.

YAP, S. P.; CHEN, P. Z. C.; GOH, Y.; IBRAHIM, H. A.; MO, K. H.; YUEN, C. W. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production.** v. 181, 155-165, 2018.

YODA, K.; SHINTANI, A. Building application of recycled aggregate concrete for upper-ground structural elements. **Construction and Building Materials.** v. 67, 379–385, 2014.

YOO, D.; BANTHIA, N.; YOON, Y. Effectiveness of shrinkage-reducing admixture in reducing autogenous shrinkage stress of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites.** 64, 27-36, 2015.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C., Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research.** v. 35, 1187– 1194. 2005.

XIAO, J.; LI, W.; FAN, Y.; HUANG, X. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). **Construction and Building Materials**. v. 31, 364–383, 2012.

XIE, T.; GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. Toward the Development of Sustainable Concretes with Recycled Concrete Aggregates: Comprehensive Review of Studies on Mechanical Properties. **J. Mater. Civ. Eng.** V. 30 (9), 2018.

ZAETANG, Y.; SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 111, 15–21, 2016.

ZHANG, J.; HOU, D.; HAN, Y. Micromechanical modeling on autogenous and drying shrinkages of concrete. **Construction and Building Materials**. 29, 230–240, 2012.

ZHANG, S. P.; ZONG, L. Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials. **Advances in Materials Science and Engineering**. 1-8, 2014.

ZIA, P.; AHMAD, S.; AND LEMING, M. **High-Performance Concretes: A State-of-Art Report (1989-1994)**. FHWA-RD-97-030, Federal Highway Administration, 1997.