



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Augusto Cezar Maciel Soares

**Avaliação experimental da retração em concretos com substituição do
agregado graúdo natural por agregados reciclados**

Rio de Janeiro

2019

Augusto Cezar Maciel Soares

Avaliação experimental da retração em concretos produzidos com substituição do agregado graúdo natural por agregados reciclados



Dissertação de mestrado apresentado como requisito final para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientadora: Prof.^a Dra. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S676 Soares, Augusto Cezar Maciel.
Avaliação experimental da retração em concretos produzidos com substituição do agregado graúdo natural por agregados reciclados / Augusto Cezar Maciel Soares. – 2019.
244f.

Orientador: Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Agregados (Materiais de construção) - Teses. 3. Concreto - Deterioração - Teses. 4. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 5. Confiabilidade (Engenharia) - Teses. I. Tavares, Maria Elizabeth da Nóbrega. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 691.322

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Augusto Cezar Maciel Soares

Avaliação experimental da retração em concretos com substituição do agregado graúdo natural por agregados reciclados

Dissertação de mestrado apresentado como requisito final para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 04 de dezembro de 2019.

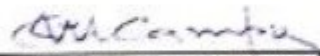
Banca Examinadora:



Profa. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares - Presidente / Orientadora
Faculdade de Engenharia – UERJ



Profa. Margareth da Silva Magalhães
Faculdade de Engenharia – UERJ



Profa. Claudia Maria de Oliveira Campos
Universidade Federal Fluminense - UFF



Profa. Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFRJ

Rio de Janeiro

2019

DEDICATÓRIA

A minha família, Afonso Baptista Soares, Maria Helena Maciel, Thalita Maciel Soares e a Luciana Noronha Silveira, por terem me apoiado ao longo de toda essa jornada. Aos meus grandes amigos Marinho Cesar e Ana Waldila, por muitas vezes terem dedicado o seu tempo a me auxiliar e, principalmente a professora Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares e ao professor Luiz Antonio Arnaud Mendes pois, sem o apoio destes mentores, este trabalho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, Afonso Baptista Soares, Maria Helena Maciel e Thalita Maciel Soares por terem acreditado que chegaríamos ao final. Ao amparo e conselhos que me foram dados nos momentos mais difíceis que juntos enfrentamos no decorrer desses anos.

A minha namorada, Luciana Noronha, que me apoiou mesmo nos momentos difíceis, provando ser uma verdadeira companheira.

Aos meus amigos Marinho Cesar, Raphael Florêncio, Bruno Dias, Beatriz Macedo, Ana Reis e Gisela Sobral, por estarem sempre presentes. Cada um deles faz parte desse grande quebra cabeça que se chamamos de vida. Tenham certeza que cada um deles colaborou para a chegada desse momento.

Ao professor Rodrigo Burgos, que por diversas esteve disposto a esclarecer os mais diversos tipos de problemas, seja de natureza acadêmica ou de vida. Ao seu brilhantismo que sempre vem acompanhado com a sua humildade faz com que mesmo o silêncio seja uma aula.

Não há palavras para expressar a gratidão que tenho a minha orientadora, Maria Elizabeth. Sem sua ajuda, nada disso seria possível e eu não chegaria a esse momento. Ela soube me motivar e superar cada barreira que me foi imposta, deixando-me apto a confrontar novos desafios. A essa grande pessoa, eu devo minha eterna gratidão.

À UERJ, por todo conhecimento que me faz tornar uma pessoa melhor e um profissional capacitado.

Somos muito pequenos e insignificantes perante o universo, mas profundamente capazes de feitos grandiosos.

Stephen Hawking

RESUMO

SOARES, Augusto Cezar Maciel. *Avaliação experimental da retração em concretos com substituição do agregado graúdo natural por agregados reciclados*. 2019. 244f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

O setor da construção civil é uns dos setores responsáveis por gerar grandes vultos de resíduos e estes, por muitas vezes, são descartados em locais inapropriados. Além disso, construção civil requer ao longo de toda a cadeia produtiva uma grande quantidade de matéria prima natural. Diante da necessidade de reduzir os impactos causados pelo setor da construção, inúmeros pesquisadores têm estudado o comportamento do concreto quando este é confeccionado com a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. As pesquisas realizadas pela comunidade científica apontam a viabilidade na utilização de agregados reciclados em concretos com fins estruturais porém, pouco se conhece sobre o comportamento a longo prazo desses concretos. Fenômenos como a retração e a fluência fazem com que as estruturas em concreto se deformando ao longo do tempo. A retração, ao contrário da fluência, faz com que os elementos se deformem ainda que estes elementos não se encontrem submetidos a esforços e essas deformações podem ocasionar o surgimento de fissuras de retração, implicando no comprometimento da durabilidade da estrutura. Assim, diante da importância deste fenômeno, este trabalho tem como objetivo determinar experimentalmente a magnitude da retração autógena e da retração por secagem em concretos de classe de resistência C60 e C40 e em concretos confeccionados com a substituição do agregado natural por agregado graúdo reciclado de concreto (RCA) e agregado graúdo reciclado de tijolo (RMA). Para estudar a retração desses concretos, foram conduzidos ensaios experimentais de acordo com a ABNT NM 131 (1997) e ASTM C157 (2017) em concretos de 60MPa produzidos com cimento CP II e CP V, concreto de 40MPa confeccionado com cimento CP II e com fator água/cimento de 0,35 e 0,38, em um traço de concreto de 40MPa com a substituição do agregado graúdo natural por 25%, 50%, 75% e 100% por RCA e por RMA. Os valores obtidos experimentalmente foram comparados com os valores indicados para concretos convencionais pela norma ABNT NBR 6118 (2014) e pelos códigos CEB-*fip* (2010), Eurocode 2 (2004) e ACI209.2R (2008). Posteriormente, os valores de retração obtidos nos concretos com reciclados foram comparados com os valores encontrados por Lye et al. (2016) e Silva et al. (2015) e estes também foram confrontados com as equações indicadas por Lye et al. (2016). Foi conduzida uma análise de covariância (ANOVA) dos grupos de concretos produzidos a fim de identificar as diferenças entre os concretos produzidos. Nesta análise foi possível identificar que a resistência do concreto e o tipo de cimento influenciaram na magnitude da retração, já a diferença no fator água cimento de 0,35 para 0,38 não implicou em diferença significativa. Por meio de regressões lineares, foram obtidas equações que melhor representem o comportamento da retração autógena e da retração por secagem dos concretos produzidos. Por meio dessas equações foram determinadas as aberturas de fissuras em uma laje de concreto utilizando a metodologia de cálculo propostas por Gilbert e Nejadi (2004), viabilizando na identificação da quantidade ideal de armadura a ser adotada nessas lajes para combater a retração.

Palavras-chave: Retração; Retração em concretos reciclados; Fissuração em concreto; Fissuração em concretos reciclados.

ABSTRACT

SOARES, Augusto Cezar Maciel. *Experimental evaluation of shrinkage in concretes with the replacement of natural coarse aggregate by recycled aggregates*. 2019. 244f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

The construction segment is one of the biggest waste producers and, this waste, frequently are disposed on inappropriate places. Additionally, the construction activity requires along the all the product chain a lot of natural. In face of the necessity to reduce the natural impact caused by the construction activity, many researchers are committed to studying the impact of the replacement of natural aggregate for recycled aggregate. The academic community appoints the viability to use this material in structural concrete but, barely is known about these long-time concrete behaviors. The shrinkage and creep phenomenon are inherent of concrete and they made the concrete structures deform along the time. In opposite of the creep phenomenon, the shrinkage brings the concrete structure to strain even the structure is unloaded and, consequently, cracks may occur, and these cracks will compromise the structural durability. Thus, in face of this phenomenon importance, this researches goal is determining the autogenous and drying shrinkage magnitude in conventional concretes with 60MPa and 40MPa of compression resistance and concretes produced with coarse aggregate replacement for recycled concrete aggregates (RCA) and recycled masonry aggregate (RMA). Therefore, to study the shrinkage of these concretes, an experimental tests were conducted in accordance by ABNT NM 131 (1997) and by ASTM C157 (2017) on concretes with resistance of 60 MPa confectioned with Brazilian cement CP II and CP V, concretes with resistance of 40 MPa with rate w/c 0,35 and 0,38 and concretes mix with 40 MPa of resistance with natural coarse aggregate replacement in proportion of 25%, 50%, 75% and 100% by RCA and RMA. The experimental results were compared with those values that was indicated by the Brazilian code NBR 6118 (2014) and the values indicated by the international codes CEB-*fip* (2010), Eurocode 2 (2004) and ACI 209.2R (2008). Subsequently, the recycled concretes results were compared with the values presented by Lye *et al.* (2016) and by Silva *et al.* (2015) and, the experimental results were compared with results obtained by Lye *et al.* (2016) equations. After this, a covariance analysis (ANOVA) was performed in different concretes groups intend to identify the differences among these concretes. This analysis permit identifies, for example, that the concrete resistance and the cement type influenced at the shrinkage magnitude, for the concretes which present w/c rate of 0,35 and 0,38, this difference did not result in significant differences. Using linear regressions analysis, equations were developed to represents the autogenous and drying shrinkage for the produced concretes. Theses equations were used to determine the crack width in concrete slabs, through the calculus model proposed by Gilbert and Nejadi (2004). Through this analysis, were possible to determine the ideal reinforcement rate to be use in slabs to prevent the shrinkage cracks.

Keywords: Shrinkage; Recycled concrete shrinkage; Crack width in concrete; Crack width in recycled concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da contração química, Balthar (2004).	29
Figura 2 – Representação esquemática da exsudação no concreto fresco, Metha e Monteiro (2014).	30
Figura 3 – Detalhe da ruptura da (a) laje de referência e (b) laje produzida com RCD, Teixeira <i>et al.</i> (2016).	40
Figura 4 – Elemento de concreto armado antes do surgimento da primeira fissura, Gilbert (1992).	41
Figura 5 – Primeira fissura em um elemento de concreto armado com deslocamento restringido, Gilbert (1992).	41
Figura 6 – Desenvolvimento das tensões no concreto ao longo do tempo, Gilbert e Nejadi (2004).	44
Figura 7 – (a) Elemento com múltiplas fissuras após a estabilização da retração, (b) tensões atuantes no concreto do elemento e (c) tensões atuantes na armadura	45
Figura 8 – Determinação da área crítica de concreto envolvente da armadura, NBR 6118 (2014).	53
Figura 9 – Área efetiva mobilizada em lajes Eurocode 2 (2004).	64
Figura 10 – Concretos utilizados no programa experimental.	71
Figura 11 – Agregado graúdo de concreto reciclado, (a) produção e (b) execução da mistura do agregado de RCA na curva granulométrica.	76
Figura 12 – Agregado graúdo de reciclado de tijolo, (a) produção e (b) execução da mistura do agregado de RMA na curva granulométrica.	78
Figura 13 - Teste de abatimento " <i>slump test</i> "	83
Figura 14 – Determinação da massa específica do concreto no estado fresco, (a) calibração da balança, (b) Leitura da massa específica do concreto no estado fresco.	84
Figura 15 – (a) Corpo de prova retificado para a realizado do ensaio de compressão axial, (b) Corpos de prova ensaiados à compressão axial.	85
Figura 16 – Ensaio de compressão diametral.	85
Figura 17 – Ensaio de módulo de elasticidade.	86
Figura 18 – (a) Forma acrílica utilizada para a confecção dos corpos-de-prova prismáticos e (b) confecção da primeira camada de concreto dos corpos-de-prova.....	87

Figura 19 – Corpos de prova de retração por secagem armazenados na câmara úmida com temperatura e umidade relativa controladas.	88
Figura 20 – (a) Calibração do relógio comparador, fixado no aparato de ensaio, (b) leitura da variação do comprimento do espécime.	89
Figura 21 – (a) formas de acrílicos usadas para o ensaio de retração por secagem e autógena e (b) Forma em teflon com 0,2mm confeccionadas para viabilizar o livre movimento do corpo-de-prova.	91
Figura 22 – Leitura da retração durante as primeiras 24h de idade, (a) através da utilização de relógios comparadores e (b) através da utilização de strain-gauge de imersão, (c) detalhe do strain-gauge de imersão e (d) Termopar utilizado.	92
Figura 23 – (a) Aquisição dos dados na primeira 24 horas de vida, (b) Pino de leitura aderido a forma pela nata de cimento.	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – (a) Influência da quantidade de reciclado de concreto na absorção do agregado reciclado e (b) influência da quantidade de reciclado de cerâmica na absorção do agregado reciclado, Agrela <i>et al.</i> (2011).	26
Gráfico 2 – Relação entre os trabalhos de retração em concreto com substituição do agregado natural por reciclado com base nos dados apresentados por Lye <i>et al.</i> (2016). ..	35
Gráfico 3 – Países que produziram pesquisas de RCA com base no primeiro autor, traduzido de Lye <i>et al.</i> (2016).	35
Gráfico 4 – Relação percentual da retração de concretos produzidos com substituição de agregado natural por agregado reciclado, Lye <i>et al.</i> (2016).	37
Gráfico 5 – Retração em concretos reciclados de RCA curados em diferentes meios ambiente, Silva <i>et al.</i> (2015).	38
Gráfico 6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.	73
Gráfico 7 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural.	75
Gráfico 8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto.	77
Gráfico 9 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado de tijolo.	79
Gráfico 10: Variação de temperatura interna no concreto (a) C40-M1 e (b) C40-M2.	100
Gráfico 11: Variação de temperatura interna no concreto com (a) 25% de RCA, (b) 50% de RCA, (d) 75% de RCA e (d) 100% de RCA.	100
Gráfico 12: Variação de temperatura interna no concreto com (a) 25% de RMA, (b) 50% de RMA, (d) 75% de RMA e (d) 100% de RMA.	102
Gráfico 13: Retração autógena compensado nas primeiras 24 horas de idade do concreto C40-M2.	104
Gráfico 14: Retração autógena compensado nas primeiras 24 horas de idade dos concretos com (a) 50% de RCA, (b) 75% de RCA e (c) 100% de RCA.	104
Gráfico 15: Retração autógena compensado nas primeiras 24 horas de idade dos concretos com (a) 25% de RMA, (b) 50% de RMA, (c) 75% de RMA e (c) 100% de RMA.	105
Gráfico 16: Retração autógena obtida (a) nos concretos C40-M1 e C40-M2, (b) nos concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de RCA e (d) nos concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de RMA.	107
Gráfico 17: Resultados experimentais da retração por secagem dos (a) concretos de classe de resistência de 60MPa e (b) concretos de classe de resistência de 40MPa.	110

Gráfico 18: Resultados experimentais da retração por secagem, (a) dos concretos com RCA e (b) dos concretos com RMA.	111
Gráfico 19: Gráfico comparativo da retração autógena dos concretos (a) C40-M1 e (b) C40-M2, com os códigos utilizados.	117
Gráfico 20: Gráfico comparativo da retração autógena dos concretos (a) 25% de RCA, (b) 50% de RCA, (c) 75% de RCA e (d) 100% de RCA , com os códigos utilizados.	118
Gráfico 21: Gráfico comparativo da retração autógena dos concretos (a) 25% de RMA, (b) 50% de RMA, (c) 75% de RMA e (d) 100% de RMA , com os códigos utilizados.	119
Gráfico 22: Gráficos comparativos da retração por secagem experimental com as normas: (a) concreto C60-ARI e (b) C60-CP II.	122
Gráfico 23: Gráficos comparativos da retração por secagem experimental com as normas: (a) concreto C40-M1 e (b) C40-M2.	123
Gráfico 24: Gráficos comparativos da retração por secagem experimental com as normas: (a) concreto 25%RCA, (b) 50%RCA, (c) 75%RCA e (d) 100%RCA.	124
Gráfico 25: Gráficos comparativos da retração por secagem experimental com as normas: (a) concreto 25%RMA, (b) 50%RMA, (c) 75%RMA e (d) 100%RMA.	126
Gráfico 26 – Avaliação comparativa da retração obtida experimentalmente nos concretos produzidos com RCA (a) com o Eurocode 2 (2004), (b) com o obtido por SILVA <i>et al.</i> (2015) e (c) com o obtido por Lye <i>et al.</i> (2016).	129
Gráfico 27 – Avaliação comparativa da retração obtida experimentalmente nos concretos produzidos com RCA com (a) o ACI 209.2R (2008), (b) com o obtido por Silva <i>et al.</i> (2015) e (c) com o obtido por Lye <i>et al.</i> (2016).	130
Gráfico 28 – (a) Avaliação comparativa da retração obtida experimentalmente nos concretos produzidos com RCA com (a) a NBR 6188 (2014) e (b) o CEB- <i>fip</i> (2010).	132
Gráfico 29 – Avaliação comparativa da retração obtida experimentalmente nos concretos produzidos com RMA com (a) a NBR 6188 (2014), (b) o CEB- <i>fip</i> (2010), (c) o Eurocode 2 (2004) e (d) o ACI 209.2R (2008).	133
Gráfico 30 – Avaliação da relação percentual entre o concreto produzido com agregados reciclados com o concreto de referência frente a Equação 3.	136
Gráfico 31 – Avaliação da relação percentual entre o concreto produzido com agregados reciclados com o concreto de referência frente a Equação 4.	137

Gráfico 32 – (a) Todos dados de retração por secagem (b) Dados de retração por secagem após o primeiro tratamento dos dados.	141
Gráfico 33 – Boxplot dos valores de retração obtidos (a) após a retirada dos concretos não similares, (b) após a retirada do primeiro grupo de outliers e (c) ao final do processo de retirada de Outliers.	143
Gráfico 34 – Retração por secagem (a) com todos os valores obtidos experimentalmente e (b) ao final do tratamento estatístico dos dados.	144
Gráfico 35 – Gráfico da regressão linear.....	145
Gráfico 36 – Regressões lineares obtidas para o (a) concreto C40-M1, (b) concreto C40-M2.	147
Gráfico 37 – Regressões lineares obtidas para o (a) concreto 25%RCA, (b) concreto 50%RCA, (c) 75%RCA e (d) 100%RCA.	148
Gráfico 38 – Regressões lineares obtidas para o (a) concreto 25%RCA, (b) concreto 50%RCA, (c) 75%RCA e (d) 100%RCA.	149
Gráfico 39 – Gráfico comparativo da retração autógena (a) dos concretos convencionais, (b) do concreto de referência com os concretos produzidos com RCA e (c) do concreto de referência com os concretos produzidos com RMA.....	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos resíduos de acordo com a ABNT NBR 15116 (2004).....	22
Tabela 2 – Requisitos para o agregado reciclado destinado ao preparo de concretos sem função estrutural adaptada da NBR 15116 (2004).....	23
Tabela 3 – Classificação dos agregados graúdos, LNEC E – 471 (2009).....	24
Tabela 4 – Limites da quantidade de concreto e de componentes cerâmicos preconizados para cada tipo de agregado reciclado, AGRELA <i>et al.</i> (2011).	25
Tabela 5 – Efeito da composição da pasta de cimento com agregados de dolomita de diversas granulometrias, Butter (2007).	33
Tabela 6 – Influência do teor de agregado miúdo na retração a luz do ACI 209.2R (2008). ...	33
Tabela 7 – Compilação dos parâmetros mais avaliados em retração de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, adaptado de Lye <i>et al.</i> (2016).....	36
Tabela 8 – Exigências relativas ao controle da abertura de fissuras indicado pela NBR 6118 (2014).....	53
Tabela 9 – Coeficientes α_i usados no cálculo da retração, CEB- <i>fip</i> (2010).....	56
Tabela 10 – Limites de abertura de fissuras de acordo com a classe de agressividade indicada pelo CEB- <i>fip</i> (2010).....	57
Tabela 11 – Valores para τ_{bms} , β e η_r para barras de aço de acordo com o CEB- <i>fip</i> (2010).	58
Tabela 12 – Valores a serem utilizados para o coeficiente k_h , Eurocode 2 (2010).....	60
Tabela 13 – Valores dos coeficientes α_{ds1} e α_{ds2} , Eurocode 2 (2010).....	61
Tabela 14 – Limitação da abertura máxima de fissuras para elementos em concreto armado de acordo com a classe de agressividade do meio ambiente, Eurocode 2 (2004).	62
Tabela 15 – Nomenclaturas adotadas para cada um dos concretos.....	72
Tabela 16 – Características físicas da areia.	73
Tabela 17 – Índices físicos do agregado miúdo natural.	74
Tabela 18 – Granulometria do agregado graúdo natural.....	74
Tabela 19 – Índices físicos do agregado graúdo natural.	75
Tabela 20 – Granulometria do agregado graúdo reciclado de concreto (RCA).....	76
Tabela 21 – Índices físicos do agregado graúdo reciclado de concreto.	77
Tabela 22 – Granulometria do agregado graúdo reciclado de tijolo (RMA)	78

Tabela 23 – Índices físicos do agregado graúdo reciclado de tijolo.....	79
Tabela 24 – Traços dos concretos de classe C60 e C40 utilizados no trabalho	81
Tabela 25 – Traços utilizados com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado para produção de 1 Betonada de 0,057m ³	81
Tabela 26 – Procedimento de mistura adotado.....	82
Tabela 27 – Frequência de leitura da retração autógena	94
Tabela 28 – Tabela resumo dos ensaios de retração autógena e por secagem realizado.....	94
Tabela 29: Propriedades dos concretos no estado fresco.	95
Tabela 30 – Propriedades mecânicas dos concretos produzidos no estado endurecido.....	96
Tabela 31 – Tabela comparativa das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com substituição de RCA e o concreto C40-M2.	97
Tabela 32– Tabela comparativa das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com substituição de RMA e o concreto C40-M2.....	97
Tabela 33 – Variação média da massa dos espécimes selados ao longo do tempo.....	98
Tabela 34 – Valores obtidos de retração autógena nas primeiras 24 horas de idade dos concretos ensaiados.	106
Tabela 35 – Relação percentual da magnitude da retração dos concretos com RCA e o concreto de referência.....	112
Tabela 36 – Relação percentual da magnitude da retração dos concretos com RMA e o concreto de referência.....	113
Tabela 37: Relação percentual da magnitude da retração dos concretos com RMA e o concreto produzido com RCA.	114
Tabela 38 – Propriedades gerais utilizadas para a determinação da retração autógena e por secagem através dos códigos normativos avaliados.	115
Tabela 39: Propriedades específicas de cada norma utilizadas no cálculo da retração autógena e da retração por secagem.	116
Tabela 40 – Variação percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores indicados pelo CEB-fip (2010) e o Eurocode 2 (2004).	121
Tabela 41 – Relação entre as relações percentuais obtidas experimentalmente e a relação percentual indicada pela Equação 4 indicada por Lye <i>et al.</i> (2016).	138
Tabela 42 – Tabela resumo da ANOVA.	139
Tabela 43 – Coeficientes da equação autógena obtida através de regressões lineares para cada um dos concretos produzidos.....	146

Tabela 44 – Área de aço das armaduras utilizadas na análise de fissuração.....	152
Tabela 45 – Taxa de armadura das armaduras utilizadas na análise de fissuração	153
Tabela 46 – Tabela resumo das propriedades dos concretos utilizados no cálculo da fissuração.	153
Tabela 47 – Idade do surgimento da primeira fissura nas lajes.....	154
Tabela 48 – Fissuração da retração com 118 dias com taxa de armadura de 0,00315 e 0,00473.	156
Tabela 49 – Fissuração da retração com 118 dias com taxa de armadura de 0,00315 e 0,00473.	156
Tabela 50 – Tabela resumo da abertura de fissuras para as taxas de armadura de 0,00315 e 0,00473.....	157
Tabela 51 – Tabela resumo do número de fissuras para as taxas de armadura de 0,00315 e 0,00473.....	158
Tabela 52 – Tabela resumo da abertura de fissuras para as taxas de armadura de 0,00579 e 0,00845.....	158
Tabela 53 – Tabela resumo do número de fissuras para as taxas de armadura de 0,00579 e 0,00845.....	159

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
OBJETIVO	19
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
1.1. AGREGADOS RECICLADOS	21
1.2. RETRAÇÃO EM CONCRETOS	28
1.2.1. <i>Retração plástica</i>	29
1.2.2. <i>Retração autógena</i>	31
1.2.3. <i>Retração por secagem</i>	32
1.2.4. <i>Retração em concretos reciclados</i>	34
1.3. ABERTURA DE FISSURAS EM LAJES DE CONCRETO	39
1.3.1. <i>Modelo de cálculo da abertura de fissuras por retração (Gilbert, 1992; Gilbert e Nejadi, 2004)</i>	41
2. MODELOS NORMATIVOS	50
2.1. ABNT NBR 6118 (2014)	50
2.1.1. <i>Determinação da retração de acordo com a NBR 6118 (2014)</i>	50
2.1.2. <i>Controle da abertura de fissuras de acordo com a NBR 6118 (2014)</i>	53
2.2. CEB-FIP MODEL CODE OF 2010	54
2.2.1. <i>Determinação da retração com o CEB-fip (2010)</i>	54
2.2.2. <i>Controle da abertura de fissuras de acordo com o CEB-fip (2010)</i>	57
2.3. EUROCODE 2 (2004)	59
2.3.1. <i>Determinação da retração de acordo com o Eurocode 2</i>	59
2.3.2. <i>Controle da abertura de fissuras de acordo com o Eurocode 2 (2004)</i>	62
2.4. ACI 209.2R (2008)	66
2.5. ACI 224R (2001)	69
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	71
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	72
3.1.1. <i>Agregado miúdo</i>	72
3.1.2. <i>Agregado graúdo natural</i>	74
3.1.3. <i>Agregado graúdo reciclado de concreto (RCA)</i>	75
3.1.4. <i>Agregado graúdo reciclado de tijolo (RMA)</i>	77

3.1.5. Cimento.....	79
3.1.6. Água.....	80
3.1.7. Aditivo superplastificante	80
3.2. DOSAGEM DO CONCRETO.....	80
3.2.1. Metodologia utilizada na mistura do concreto.....	82
3.3. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS PRODUZIDOS	83
3.4. METODOLOGIA DE ENSAIO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM	87
3.5. METODOLOGIA DE ENSAIO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA	90
3.6. RESUMO DOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO REALIZADOS	94
4. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO	95
4.1. RESULTADO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CONCRETOS PRODUZIDOS	95
4.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA RETRAÇÃO AUTÓGENA	98
4.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA RETRAÇÃO POR SECAGEM.....	109
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	115
5.1. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RETRAÇÃO COM AS NORMAS ADOTAS	115
5.2. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RETRAÇÃO COM A BIBLIOGRAFIA UTILIZADA	128
5.3. ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM DOS CONCRETOS PRODUZIDOS (ANOVA).....	138
5.4. REGRESSÃO LINEAR DA RETRAÇÃO AUTÓGENA DOS CONCRETOS PRODUZIDOS	146
5.5. ANÁLISE DA FISSURAÇÃO DOS CONCRETOS	152
CONCLUSÕES.....	160
REFERÊNCIAS	163
ANEXO A.....	169
ANEXO B.....	236

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, diversos pesquisadores do Brasil e do mundo vem estudando a viabilidade do uso de agregados reciclados em concretos. Estas substituições podem ser de forma parcial ou até total do agregado natural graúdo (ZORDAN, 1997; BAZUCO 1999; LEITE, 2001; SUZUKI et al., 2009; TRINDADE 2017), como também podem ocorrer também na substituição da fração miúda (RAVINDRARAJA et al. 1987, LEITE, 2001; MARUYAMA, 2007).

Inicialmente, muitos dos pesquisadores objetivaram em estudar a influência do teor de substituição do agregado natural (NA) pelo agregado reciclado (RA) nas propriedades mecânicas do concreto. Tais pesquisas colaboraram para elucidar como este novo material virá a influenciar no comportamento estrutural.

Por outro lado, o pleno entendimento da atuação do carregamento, assim como a interferência que o meio ambiente virá a causar numa estrutura confeccionada com concreto convencional, ou reciclado, é de vital importância para a durabilidade. Quando se trata de estruturas de concreto, o estudo da durabilidade se torna de extrema importância, pois a avaliação inadequada das condições atuantes pode levar os elementos estruturais a sofrerem deformações excessivas e, conseqüentemente, levando a redistribuição de tensões para os demais elementos estruturais, causando um acréscimo de tensão não previsto durante o projeto.

Este acréscimo de tensões pode levar ao surgimento e aberturas acentuadas de fissuras, perda de funcionabilidade, colapso parcial e, em casos extremos, o colapso total. Tal fato é extremamente indesejado pois resulta em custos econômicos e sociais (ALMEIDA, 2006; KATAOKA, 2010).

Por outro lado, os elementos de concreto armado estão sujeitos a fenômenos que se desenvolvem ao longo do tempo, como o caso da fluência e da retração. A fluência faz com que os elementos comprimidos continuem se deformando ao longo do tempo, o que pode piorar o processo de deterioração, pois a variação de deformação diferencial entre elementos faz com que a tensão se redistribua até que se alcance o equilíbrio. Já a retração é um fenômeno que independe do carregamento, mas assim como a fluência, se desenvolve ao longo do tempo. Este fenômeno, conforme veremos a seguir, apresenta uma forte relação com o meio ambiente no qual a estrutura está inserida.

Objetivo

Este trabalho tem por objetivo principal investigar a magnitude da retração em concretos confeccionados com substituição do agregado natural por agregado graúdo reciclado de concreto (RCA) e agregado graúdo reciclado de tijolo (RMA) e investigar a influência da retração desses concretos no processo de fissuração de lajes que exerçam impedimento as variações dimensionais impostas por este fenômeno.

Como objetivo secundário, este trabalho tem por objetivo investigar a interferência da substituição do agregado graúdo reciclado pelo agregado graúdo natural nas propriedades mecânicas do concreto quando houver a compatibilidade da granulometria desses materiais.

Estrutura da dissertação

No primeiro capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica dos mecanismos envolvidos no fenômeno da retração e o modelo preditivo de abertura de fissuras de GILBERT (1992), o qual foi utilizado na determinação da abertura da fissura dos concretos ensaiados.

No segundo capítulo serão apresentados os principais modelos normativos preconizados pela NBR 6118 (2014), CEB-fip (2010), Eurocode 2 (2004) e O ACI 209.2R (2008) para prever a magnitude da retração em concretos. Também serão apresentadas as considerações apontadas pela NBR 6118 (2014), CEB-fip (2010), Eurocode 2 (2004) e O ACI 224 (2001) para a controle da abertura de fissuras e os limites aceitáveis por estes códigos.

No terceiro capítulo, será apresentado o programa experimental adotado para a determinação da magnitude da retração autógena e por secagem em concordância com as normas NM 131 (1997) e a ASTM 157 (2017). Neste capítulo também serão apresentadas as propriedades dos materiais utilizados ao longo do programa experimental.

No quarto capítulo, serão apresentados os resultados experimentais da retração autógena e da retração por secagem, assim como uma avaliação dos resultados obtidos frente as prescrições normativas.

No quinto capítulo será realizada uma a avaliação dos resultados obtidos frente a bibliografia utilizada nesta pesquisa a fim de validar os resultados experimentais e, neste

capítulo, serão apresentadas as avaliações estatísticas dos resultados obtidos experimentalmente assim como, serão apresentadas as equações obtidas através de regressões lineares.

Por fim, no último capítulo, serão apresentadas as conclusões alcançadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, além de considerações e sugestões para futuros trabalhos a serem realizados.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Agregados reciclados

A construção civil é um dos setores econômicos que é responsável pela produção e geração de grandes vultos de resíduos. Estes resíduos, por muitas vezes, são depositados em locais inadequados, como aterros ou lixões, e tal fato pode resultar em impactos ambientais irreversíveis muitas vezes irreversíveis.

O concreto, por sua vez, como material de construção, é um dos materiais mais utilizados no mundo e este material utiliza em grande parte da sua composição os agregados naturais como matéria prima. Estes agregados normalmente são de origem natural mas podem ser artificiais ou até mesmo reciclados. Os agregados naturais são comumente obtidos através da exploração de areais, leito de rios, desmonte de pedreiras etc.

Assim, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, promulgou a resolução Nº 307 em julho de 2002, CONAMA Nº 307/2002, que apresenta como principal objetivo criar mecanismos para regulamentar o descarte dos rejeitos da construção civil. Além de colaborar na redução dos impactos causados pelo descarte inadequado dos resíduos, esta medida também possibilita a utilização de parte dos resíduos como agregados para concretos e tal fato colabora indiretamente na redução dos impactos causados pelo setor na exploração de jazidas minerais

A CONAMA Nº 307 classifica os resíduos produzidos pela construção civil em classes, variando de resíduos Classe A até resíduos Classe D. Esta resolução classificou os resíduos que podem ser reutilizados na forma de agregados como resíduos Classe A. Os resíduos Classe B são aqueles que podem ser reciclados e reutilizados para outros fins, como o caso de plásticos, vidros, madeira, embalagens vazias, gesso etc. Os resíduos Classe C são aqueles que ainda foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que possibilitem a sua reutilização ou reciclagem. Por fim, os resíduos Classe D, são os resíduos perigosos, como o caso de tintas, solventes, óleos, materiais que contenham amianto, materiais oriundos da demolição de instalações radiológicas, e outros subprodutos que possam representar risco a saúde.

A utilização de resíduos da construção como agregados na construção civil não é novidade no setor, este material vem sendo utilizado na Europa como agregado para concreto desde o final da 2ª Guerra Mundial e por conta disso, nas últimas décadas, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo pesquisas a respeito da reutilização deste material na

produção de concretos. Diante dos resultados positivos apresentados pelas pesquisas realizadas sobre a reutilização de elementos estruturais e entulhos como agregados para concreto, diversos países confeccionaram normas técnicas com objetivo de regulamentar a utilização desses agregados reciclados em concretos que sejam, ou não, destinados a fins estruturais.

No Brasil, a ABNT NBR 15116 (2004) aponta que os agregados reciclados podem ser utilizados em pavimentação viária e em concretos sem fins estruturais. Semelhante a classificação utilizada pela CONAMA N° 307 esta norma também classifica os resíduos provenientes da construção civil em Classes, de modo que as classes dependem do tipo de resíduo oriundo, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos resíduos de acordo com a ABNT NBR 15116 (2004).

Classe	Tipo de resíduo
A	Resíduo de construção, demolição, reformas, reparos de pavimentação, provenientes de peças pré-moldadas, alvenarias, cerâmicos e outros.
B	Plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas aplicações economicamente viáveis para a sua utilização, com por exemplo o gesso.
D	Resíduos perigosos, como tintas, solventes, óleos, oriundos de reforma de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros que sem encontram como classe I da ABNT NBR 10004.

De acordo com esta norma, o agregado reciclado de concreto (RCA) é aquele obtido através do beneficiamento do resíduo pertencente a Classe A, o qual apresentam pelo menos 90% da sua fração em massa de fragmentos à base de produtos cimentícios (concretos e argamassas) e rochas.

Por outro lado, para o agregado reciclado misto (RMA), esta norma classifica como sendo aquele que apresenta menos do que 90% de sua massa de fragmentos à base de produtos cimentícios e rochas.

Devido à grande variabilidade deste material, a NBR 15116 (2004) aponta que os agregados reciclados, destinados a utilização em concretos sem função estrutural devem atender aos requisitos indicados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Requisitos para o agregado reciclado destinado ao preparo de concretos sem função estrutural adaptada da NBR 15116 (2004).

Propriedades	Agregado reciclado Classe A				Normas de ensaio	
	Agregado reciclado de concreto		Agregado reciclado misto			
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)	≥ 90%	-	< 90%	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)	≤ 7%	≤ 12%	≤ 12%	≤ 17%	NBR NM 53 (2003)	NBR NM 30 (2001)
Contaminantes	Cloretos		1		NBR 9917 (2009)	
	Sulfatos		1		NBR 9917 (2009)	
	Materiais não minerais		2		Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila		2		NBR 7218 (2010)	
	Teor máximo de contaminantes		3		-	
Teor de material passante na malha de 75µm (%)	≤ 10%	≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	NBR NM 46 (2003)	

Em Portugal, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil LNEC, o qual é organismo público, através da LNEC E – 471 (2009), classifica os agregados reciclados em três classes (ARB1, ARB2 e ARC). Na Tabela 3 são apresentados os limites pertencentes de cada tipo de material em cada uma das três classes apontadas pelo código LNEC E -471 (2009).

O código LNEC E – 471 (2009) permite a utilização do agregado reciclado em concretos para fins estruturais, mas limita o teor de substituição do agregado natural pelo reciclado. Para o caso da utilização do agregado de Classe ARB1, esta norma permite a utilização deste material em concretos de classe de resistência C40/50 desde que não se ultrapasse a substituição de 25% de agregado natural pelo agregado reciclado. Já para o caso da utilização do agregado reciclado de Classe ARB2, é permitida a utilização deste produto em concretos de classe de resistência C35/45 desde que não se ultrapasse o teor de substituição do agregado natural em 20%. Para o caso do agregado reciclado ARC, o código LNEC E – 471 (2009) só permite a utilização deste material em concretos de enchimento e/ou de regularização, ou seja, sem fins estruturais em ambientes não agressivos.

É possível observar na Tabela 3, que a diferença entre o agregado de classe ARB2 sem fim estrutural para o ARC é a quantidade de betume presente na amostra, de modo que o primeiro apresenta o máximo de 5% e o segundo o máximo de 10%. Desta forma, é possível entender que a presença deste material no agregado reciclado influencia negativamente nas propriedades do concreto, ao ponto que este não possa ser utilizado para funções estruturais.

Tabela 3 – Classificação dos agregados graúdos, LNEC E – 471 (2009).

Classes	Proporção dos constituintes (EM 12620:2002/A1:2008)					
	Rc (%)	Rc + Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)	X + Rg (%)	FL (%)
ARB 1	≥ 90		≤ 10	≤ 5	≤ 0,5	≤ 2
ARB 2	≥ 70		≤ 30	≤ 5	≤ 1	≤ 2
ARC		≥ 90		≤ 10	≤ 1	≤ 2

Constituintes (EM 933-11)

Rc – Concreto, produtos de concreto e argamassa;

Ru – Agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos;

Ra – Material betuminoso;

Rb – Elementos de alvenaria de materiais argilosos (Tijolos, ladrilhos, telhas etc.), elementos de alvenaria de cálcio e concreto não celular não flutuante;

Rg – Vidro;

RF – Material flutuante em volume;

X – Outros: Materiais coesivos (ex. solos argilosos), plásticos, borrachas, metais (ferrosos e não ferrosos) madeira não flutuante e estuque.

Ao comparar o que é indicado pelo LNEC, através da Tabela 3, com o preconizado pela NBR 15116 (2004), Tabela 2, é possível constatar a equivalência entre o agregado reciclado ARB1 preconizado pela LNEC – E 471 (2009) com o agregado reciclado de RCA destinado ao uso em obras de pavimentação viária e a concretos sem função estrutural. Assim, é possível observar que a comunidade europeia permite a utilização deste material para fins estruturais ao passo que a norma brasileira ainda apresenta caráter conservador, não indicando o uso deste produto, independente do teor de substituição em elementos estruturais.

Adicionalmente, é possível observar também que o código LNEC – E 471 (2009) permite que agregados que possuam teor de alvenaria superior a 10% também possam ser utilizados em concretos estruturais, desde que a presença de elementos de alvenaria e cerâmicas não ultrapassem 30% do material reciclado, sendo este classificado como Classe ARB2. Ainda de acordo com este código, este agregado pode ser utilizado em concretos estruturais, desde que não se ultrapasse o teor de substituição de 20% do agregado natural pelo reciclado. Já a norma brasileira, aponta que este material não deve ser utilizado em concretos estruturais.

Para Agrela *et al.* (2011), os agregados reciclados podem ser provenientes de elementos estruturais em concreto (RCA), reciclados cerâmicos (RMA) e reciclados mistos (MixRA ou MRA) desde que estes atendam os limites dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites da quantidade de concreto e de componentes cerâmicos preconizados para cada tipo de agregado reciclado, AGRELA *et al.* (2011).

Tipo de agregado reciclado	Quantidade de concreto	Quantidade de cerâmica
Reciclado de concreto – RCA	$\geq 90\%$	$\leq 10\%$
Reciclado de cerâmica – RMA	$< 70\%$	$> 30\%$
Reciclado misto – MRA	$70\% \leq \text{Teor} < 90\%$	$0\% \leq \text{Teor} < 30\%$

Concatenando as informações contidas no código do LNEC – E 471 (2009) com as apontadas por Agrela *et al.* (2011) é possível dizer que o agregado reciclado de concreto (RCA) apresenta concordância com o agregado ARB1 do código LNEC – E 471 (2009) e, de acordo com o código português, este material pode ser utilizado em concretos estruturais com resistência de C 40/50, desde que não ultrapasse o teor máximo de substituição de 25%.

Ao comparar a quantidade necessária de material provenientes de concreto e de cerâmica para que este seja classificado como agregado RMA por Agrela *et al.* (2011), é possível constatar que é necessário que este apresente quantidade superior a 30% de material cerâmico. Já o código LNEC – E 471 (2009) aponta que para o agregado ARB2 seja utilizado para fins estruturais, em concretos de classe de resistência C 35/45, este não ultrapasse o teor máximo de 30% de material cerâmico e não seja substitua mais que 20% o agregado natural, para o caso de teores superiores, este material não poderá ser utilizado para fins estruturais.

Devido à alta absorção que o agregado reciclado pode apresentar, esta propriedade pode influenciar significativamente no traço do concreto. Desta forma, faz-se necessária a avaliação adequada da metodologia a ser empregada durante o processo de produção do concreto.

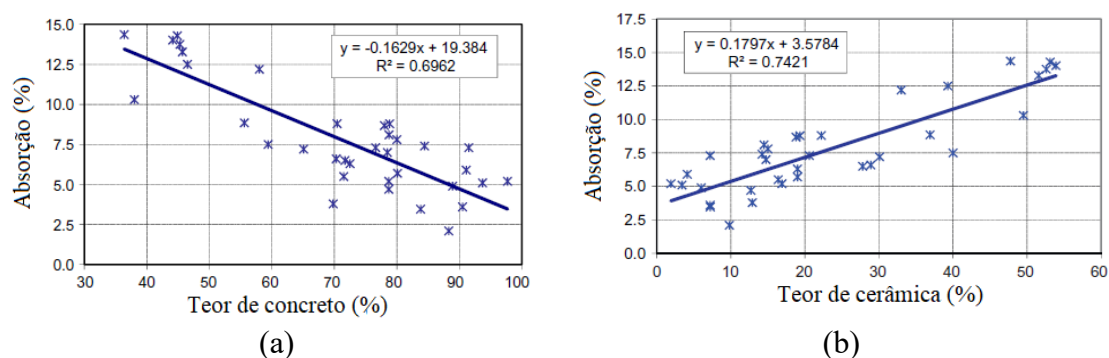
No estudo realizado por Agrela *et al.* (2011), é possível observar que quanto maior for a presença da parcela reciclada de concreto no corpo do agregado reciclado menor será a absorção (Gráfico 1.a). Porém, ainda assim, o agregado reciclado de concreto apresenta uma absorção superior a absorção encontrada em agregados de origem natural.

Ainda no estudo realizado por Agrela *et al.* (2011), é possível observar que ao passo em que a cerâmica é inserida no material reciclado este aumenta significativamente a absorção do agregado reciclado. Tal fato pode ser observado no Gráfico 1.b.

Um dos maiores problemas enfrentados na substituição do agregado natural pelo agregado reciclado é a perda da trabalhabilidade que ocorre devido a substituição do agregado

natural pelo reciclado, decorrente da absorção de uma parcela da água de mistura pelos agregados reciclados.

Gráfico 1 – (a) Influência da quantidade de reciclado de concreto na absorção do agregado reciclado e (b) influência da quantidade de reciclado de cerâmica na absorção do agregado reciclado, Agrela *et al.* (2011).



Segundo Levy (1997) *apud* Bazuco (1999), é necessário elevar em 15% a relação água/cimento (a/c) para manter a trabalhabilidade do concreto quando há a substituição integral do agregado natural pelo agregado reciclado. Os autores apontam que para o caso de concretos confeccionados apenas com a substituição da fração graúda pelo material reciclado, é necessário elevar em 5% a relação a/c para manter a trabalhabilidade.

Bazuco (1999) aponta que devido à grande variabilidade de absorção encontrada no agregado reciclado, torna-se difícil computar a quantidade real de água disponível na mistura para hidratar o cimento.

Silva *et al.* (2015), aponta em sua obra, que para o caso dos agregados naturais, devido a sua baixa absorção, uma simples compensação de água durante a mistura do traço é o suficiente para compensar o volume que será absorvido pelo material.

Para o caso do agregado reciclado de concreto, como este apresenta uma elevada absorção, quando comparado com a absorção do agregado natural, Hasen (1992) *apud* Silva *et al.* (2015) aponta que o RCA deve ser utilizado na condição saturada superfície seca (SSS), necessitando haja pré-molhagem, já para Leite (2001) *apud* Silva *et al.* (2015) este problema pode ser contornado pela simples compensação de água durante a confecção do concreto.

Ainda que a NBR 15116 (2004) não indique a utilização de RCA em concretos estruturais, a Norma Brasileira aponta também aponta necessidade de realizar pré-molhagem dos agregados antes da sua utilização. Por outro lado, a LNEC – E 471 (2009) não apresenta definições sobre o assunto.

Segundo Silva et al. (2015), ainda que seja difícil garantir que o agregado reciclado esteja na condição SSS, a utilização deste agregado nesta condição faz com que o concreto produzido com este material apresente uma trabalhabilidade semelhante ao concreto de controle.

Já no estudo realizado por Leite (2001), os agregados reciclados ensaiados pela autora absorveram água o suficiente para preencher aproximadamente 45% dos vazios nos primeiros 10 minutos e o preenchimento do restante dos vazios ocorreu nas próximas horas seguintes. Tal fato impactará na perda de trabalhabilidade do concreto, visto que ao longo do processo de mistura do concreto, o agregado absorverá parte da água adicionada.

Já o estudo realizado por Agrela *et al.* (2011), através da análise de 35 amostras, aponta que os agregados reciclados são capazes de absorver em 10 minutos cerca de 85% que iriam absorver em 24h, apresentando um coeficiente de correlação de 88%. Segundo os autores, para compensar a quantidade de água restante, pode-se aplicar um fator de correção de 1/0,85 na água do traço.

Segundo Silva *et al.* (2015), o método de compensação de água indicado por Leite (2001) conduz a perda de trabalhabilidade do traço, quando este é comparado com o concreto de origem, mas, por outro lado, a utilização deste método apresenta o benefício de reduzir da retração.

De acordo com o trabalho realizado por De Brito e Bizinotto (2011), a utilização de pré-saturação no agregado reciclado de concreto fez com que este apresentasse uma retração com magnitude superior ao do concreto produzido com o método de compensação proposto por Leite (2001).

Para Leite (2001), a determinação dos índices físicos, como a massa específica e a massa unitária deste novo material, é de vital importância, mas muitas vezes de difícil determinação pois, devido à natureza frágil deste material o agregado pode se fragmentar ao ser manuseado, assim como durante o processo de secagem. Tal fato levará a gerar incertezas nos índices físicos o que, conseqüentemente, virá a influenciar no traço do concreto e, por desdobramento, nas propriedades mecânicas da matriz cimentícia.

Ainda por Leite (2001), é proposto que para a elaboração de traços de concreto substituindo o agregado natural pelo reciclado, a substituição deve ser realizada pelo volume de material pois, os agregados reciclados comumente apresentam massa específica inferior ao agregado natural.

Para Fathifazl et al. (2011), ao produzir o agregado reciclado, a força que o britador faz durante do processo de britagem do concreto faz com que a parte deteriorada do material de origem seja significativamente reduzida, melhorando a qualidade do agregado reciclado.

Assim, Leite (2001) indica a utilização da Equação 1 para determinar a massa equivalente de agregado miúdo reciclado de modo que a substituição não cause distorções no volume do traço.

$$M_{amr} = M_{amn} \times \frac{\gamma_{amr}}{\gamma_{amn}} \quad (1)$$

Onde:

M_{amr} é a massa do agregado miúdo reciclado (Kg);

M_{amn} é a massa do agregado miúdo natural (Kg);

γ_{amr} é a massa específica do agregado miúdo reciclado (Kg/dm³);

γ_{amn} é massa específica do agregado miúdo natural (Kg/dm³).

Assim, para não distorcer a proporção do traço, esta metodologia foi aplicada neste trabalho.

1.2. Retração em concretos

Conforme mencionado, a retração é um fenômeno que se desenvolve ao longo do tempo. Este fenômeno pode ser subdividido em retração plástica, retração autógena, retração por secagem e retração por carbonatação.

Segundo Gayarre *et al.* (2019) apud Neville (2012), o estudo isolado da retração autógena em face da retração por secagem não é usual em concretos convencionais pois, a retração autógena representa uma pequena parcela da retração total e, de forma prática, ambos os fenômenos irão ocorrer simultaneamente.

Todavia, o entendimento dos mecanismos da retração em concretos é de vital importância para o entendimento do comportamento deste fenômeno em concretos reciclados.

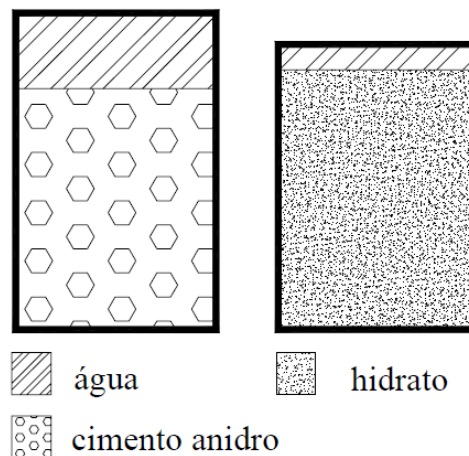
1.2.1. Retração plástica

A retração plástica ocorre durante o momento em que o concreto ainda se encontra na fase fluida. A água adicionada no concreto tem a função de promover a hidratação dos grãos de cimento mas, além desta função, é necessário que se adicione uma parcela extra para promover a trabalhabilidade do traço.

A contração química ocorre devido ao balanço volumétrico da reação de hidratação dos grãos de cimento pois, o volume dos hidratados formados pelo processo de hidratação é inferior a soma dos volumes dos produtos de hidratação e, como este fenômeno ocorre com o concreto ainda na fase fluida, a redução do volume ocorre na direção da gravidade, Balthar (2004). A representação esquemática deste fenômeno pode ser verificada na Figura 1.

Holt e Leivo (2003) *apud* Balthar (2004) apontam que grande parte deste fenômeno logo nas primeiras do início do processo de hidratação do cimento e que fatores como a finura e a eficiente do cimento em se dispersar na mistura influenciam significativamente na magnitude da contração química.

Figura 1 – Representação esquemática da contração química, Balthar (2004).

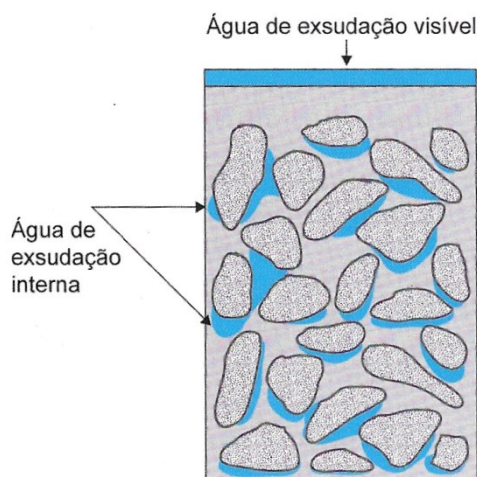


Já a quantidade extra de água comumente adotada nos traços destinada a promover a trabalhabilidade do concreto, por ser menos densa que os demais materiais empregados no concreto, irá migrar para a superfície do concreto, dando início ao processo de exsudação, o qual pode ser dividido em exsudação interna ou externa.

Durante o processo migratório da água à superfície, a água pode ficar aprisionada na face inferior do concreto, levando a um aumento local do fator água/cimento (a/mc). Este fator irá influenciar diretamente na resistência da zona de transição (ZT) do concreto. O aumento do fator a/mc local favorece a hidratação, levando a formação de produtos hidratados orientados e com dimensões maiores, Metha e Monteiro (2014). Tal fato traz como consequência uma matriz cimentícia nessa região seja mais frágil e porosa.

Adicionalmente, a parcela da água que não ficou retida no interior da matriz cimentícia emergiu à superfície irá formar uma película de água visível na superfície do concreto, como mostra a Figura 2. Porém, uma combinação desfavorável da temperatura, umidade relativa e da velocidade do vento pode fazer com que o concreto exposto perca água para o meio ambiente numa velocidade indesejável. Para Neville e Brooks (2013), uma velocidade de evaporação superior a $0,25 \text{ kg/h/m}^2$ deve ser evitada já o ACI 305-1 (2006) aponta que devem ser evitados valores superiores a $1,0 \text{ kg/h/m}^2$ e, como consequência, procedimentos de controle de evaporação da água devem ser tomados para evitar que haja a evaporação excessiva da água.

Figura 2 – Representação esquemática da exsudação no concreto fresco, Metha e Monteiro (2014).



A retração plástica ocorre devido a rápida perda de água do concreto ainda no seu estado plástico, levando ao surgimento de fissuras logo nas primeiras horas de vida do concreto e, como este fenômeno está diretamente relacionado a perda de água para o meio ambiente, concretos com fator a/mc elevados tendem a apresentar maiores retrações plásticas pois permitem uma maior possibilidade de movimentação de água através das redes de capilares, Romano *et al.* (2011).

1.2.2. Retração autógena

A retração autógena é caracterizada pela variação dimensional, macroscópica, que ocorre em pastas de cimento após o limiar de percolação e sem que haja perda ou troca de umidade do elemento com o meio externo. Na medida em que há a hidratação dos grãos de cimento a quantidade de água disponível dentro da matriz cimentícia diminui e, conseqüentemente, a umidade interna na matriz também irá diminuir na medida a hidratação do cimento anidro evolui (RODRIGUES, 2011 apud TAZAWA, 1999; TAVARES, 2008).

Assim, por conta do processo de auto dessecação, a umidade interna da matriz cimentícia diminui e redes de capilares passam se formar no interior do elemento. A água livre ainda disponível nos poros passa a migrar pelo esqueleto cimentício para participar de reações de hidratação ou também para adsorver os compostos hidratados de C-S-H (BALTHAR, 2004; TAVARES 2008; MENDONÇA LOPES, 2011).

No desenvolver da auto-secagem do concreto, meniscos se formam na interface líquido-gás de um poro não saturado, através do fenômeno da depressão capilar. Por conta do consumo da água disponível pelas partículas anidras de cimento, há uma redução na pressão de separação, resultando em aproximação dos grãos e, conseqüentemente, levando o concreto retrair (BALTHAR, 2004; MENDONÇA LOPES, 2011).

Segundo Laplante (1993) *apud* Balthar (2004), a retração autógena pode ser subdividida em três etapas. A primeira etapa, ou 1º retração é decorrente da consumação química do cimento e ocorre logo nas primeiras horas após o início do processo de hidratação do cimento, podendo variar de 2 a 3 horas. A segunda etapa, ou processo de expansão, é decorrente da precipitações dos cristais de etringita durante a pega do cimento e esta etapa pode ocorrer entre 4 e 10 horas após o início do processo de hidratação do concreto. Por fim, a terceira etapa, também conhecida como segunda retração, ocorre após a pega do cimento e se estende até a finalização do processo de hidratação do cimento, esta etapa é também conhecida como auto-secagem e pode ocasionar em deformações no concreto de magnitudes significativas.

Entretanto, para Balthar (2004) as variações volumétricas que podem ser conceituadas como retração são aquelas que ocorrem a partir do momento em que já se atingiu o limiar de percolação, ou seja, que o concreto se encontra no estado sólido, sendo assim, apenas a 2ª Retração apontada por Laplante que pode ser considerada como retração.

1.2.3. Retração por secagem

Devido a diferença de umidade existente entre o concreto e o meio ambiente, este quando submetido a secagem perde a água presente no seu interior para o meio externo. Assim, através da depressão capilar surge um fluxo hídrico do interior da matriz para o meio externo até que se atinja o equilíbrio higroscópico, Dellinghausen (2009).

Segundo Neville e Brooks (2013), um fator a/mc de 0,40 é o ideal para que se promova a hidratação do cimento completo e, por consequência, a água adicionada para promover a trabalhabilidade da mistura irá se tonar em água capilar.

Diante disso, o volume extra de água disponível nos capilares será perdido para o meio ambiente através do processo de secagem, resultando em retração.

O volume total de agregados influencia na retração por secagem, pois, na medida em que a fração gráuda aumenta maior será o grau de restrição interna, resultando em retrações menores (DELLINGHAUSEN, 2009; DINIZ, FERNANDES e KUPERMAN, 2011; NEVILLE e BROOKS, 2013). Como o agregado gráudo representa grande parcela da mistura, o concreto irá apresentar propriedades que apresentam fortes correlações com as características deste material, como o caso do módulo de elasticidade. Autores como Diniz *et al.* (2011), Neville e Brooks (2013), Fathifazl *et al.* (2011), apontam que a qualidade do agregado utilizado irá influenciar diretamente no módulo de elasticidade e, conseqüentemente, na magnitude da retração e da fluência.

Ensaio realizados por Furnas deflagram o efeito da dimensão e da granulometria do agregado na retração. Foi analisada a retração para a pasta de cimento pura com fator água cimento de 0,40, e para argamassas com traço de 1:1 utilizando agregados com faixas granulométricas apresentadas na Tabela 5 (BUTTER, 2007 *apud* FURNAS, 1997).

Apesar da descontinuidade existente na faixa de 0.6-1.2, é possível observar que quanto maior for a dimensão do grão do agregado menor será a retração do concreto, apontando a granulometria influencia diretamente na magnitude da retração. Diante disto, para estudar a retração em concretos com substituição do agregado natural por agregado reciclado, deve-se atentar para não alterar a granulometria do agregado, sob o risco deste parâmetro influenciar na magnitude da retração.

Tabela 5 – Efeito da composição da pasta de cimento com agregados de dolomita de diversas granulometrias, Butter (2007).

Tamanho do agregado	Faixa granulométrica (mm)						
	Pasta de cimento	0,3-0,6	0,6-1,2	1,2-2,4	2,4-4,8	4,8-9,5	9,5-19
Retração em um ano ($\times 10^{-6}$)	2710	1190	1240	1220	1160	940	690

A influência deste parâmetro na retração de concretos é levada em consideração pela metodologia de cálculo indicada pelo ACI 209.2R (2008) através do parâmetro $\gamma_{sh,\psi}$. Este utilizado no cálculo da retração pelo código do ACI, indicado na Equação 2, pondera a influência da relação da proporção entre o agregado graúdo e miúdo presente no concreto.

$$\gamma_{sh,\psi} = \begin{cases} 0,30 + 0,014 \times \psi & \text{para } \psi \leq 50\% \\ 0,90 + 0,002 \times \psi & \text{para } \psi > 50\% \end{cases} \quad (2)$$

Na Equação 2, o parâmetro ψ representa o teor de agregado miúdo presente no concreto. Desta forma, é possível observar na Tabela 6 que ao reduzir o montante da parcela fina no concreto, a magnitude da retração diminui, ao passo que ao aumentar o teor do agregado miúdo leva a retrações maiores.

Tabela 6 – Influência do teor de agregado miúdo na retração a luz do ACI 209.2R (2008).

Coeficiente $\gamma_{sh,\psi}$ do ACI 209.2r			
Teor de agregado miúdo $\leq 50\%$		Teor de agregado miúdo $> 50\%$	
Teor (%)	Valor de $\gamma_{sh,\psi}$	Teor (%)	Valor de $\gamma_{sh,\psi}$
0	0,3	51	1,002
5	0,37	55	1,01
10	0,44	60	1,02
15	0,51	65	1,03
20	0,58	70	1,04
25	0,65	75	1,05
30	0,72	80	1,06
35	0,79	85	1,07
40	0,86	90	1,08
45	0,93	95	1,09
50	1	100	1,1

Outro parâmetro relevante na retração por secagem é a relação do volume com a área exposta (V/S), utilizado pelo ACI 209.2R (2008), ou relação da área da seção transversal com o perímetro exposto a secagem (A_c/u), utilizado pela ABNT NBR 6118 (2014), CEB-fip (1990), CEB-fip (2010) e também pelo Eurocode 2 (2004).

Elementos que apresentam maiores relação entre a superfície/volume tendem a apresentar maiores retração, Senisse (2010). Tal fato pode ser observado em lajes, pois apresentam elevada superfície de exposição face ao seu volume.

Segundo Senisse (2010), tal fato ocorre devido a facilidade que estes elementos apresentarem em perder água para a secagem, pois o caminho da difusão da água pelos capilares é menor quando comparado com elementos que apresentam baixa relação entre V/S (elementos maciços).

A secagem não uniforme faz com que surjam gradientes de saturação. Em elementos como placas, as extremidades tendem a secar mais rápido que o centro. Desta forma, durante o processo de secagem leva ao surgimento de um campo de deformações no qual as extremidades (regiões mais secas) se deformam mais que o centro (mais úmido) (GILBERT, 2001; SENISSE, 2010). Tal fato faz com que placas de concreto estejam sejam sujeitas ao surgimento de fissuras como também ao empenamento, Senisse (2010).

1.2.4. Retração em concretos reciclados

Lye *et al.* (2016), em sua obra, realizou um levantamento dos trabalhos de retração por secagem disponíveis em língua inglesa. Neste trabalho, é possível observar que da quantidade de trabalhos publicados com a substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto representa 83,56% do montante dos trabalhos, agregado reciclado de tijolo representam 11,30% dos trabalhos, agregados mistos representam 3,78% da fatia, agregado reciclado de construção e demolição representam 0,68% e trabalhos com substituição por agregado reciclado de concreto leve representa 0,68% dos trabalhos, conforme pode ser observado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Relação entre os trabalhos de retração em concreto com substituição do agregado natural por reciclado com base nos dados apresentados por Lye *et al.* (2016).

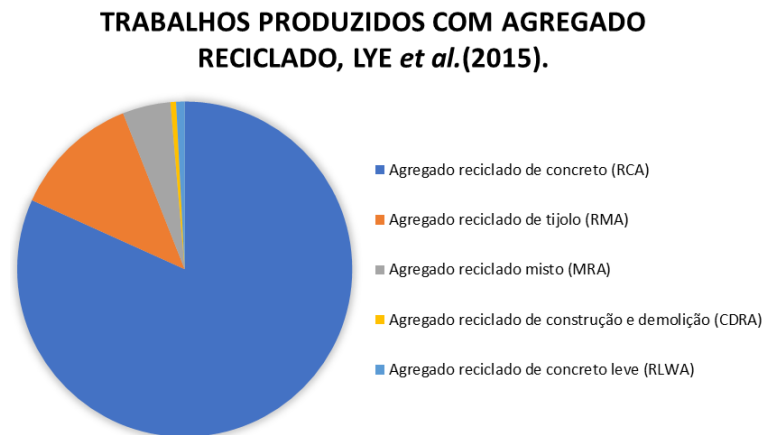
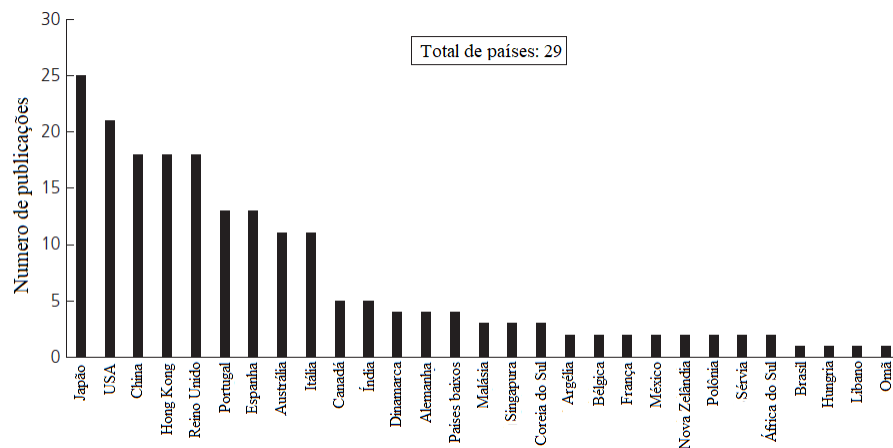


Gráfico 3 – Países que produziram pesquisas de RCA com base no primeiro autor, traduzido de Lye *et al.* (2016).



Para Lye *et al.* (2016), ao longo dos anos, há uma tendência de aumento no número de trabalhos relacionados a concreto com agregado reciclado de concreto e os países que mais produzem é o Japão e os Estados Unidos, conforme apresentado no Gráfico 3. Já na Tabela 7 é possível observar quais são os parâmetros mais utilizados nos ensaios de retração avaliados pelos autores.

Segundo o exposto na obra de Lye *et al.* (2016), muitos dos trabalhos avaliados pelo autor não apresentam informações a respeito de qual código foi utilizado, o tipo de espécime adotado, a idade da leitura inicial e outras informações pertinentes, mas, com base no trabalho apresentado, foi possível sintetizar na Tabela 7 quais são as variáveis mais estudadas pela comunidade. Assim, com base no apresentado na Tabela 7, é possível observar uma tendência

da comunidade científica em utilizar o código ASTM C157 (2014) assim como o que este preconiza.

De acordo com Lye *et al.* (2016), a retração em concreto com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado aumenta na medida em que se aumenta o teor de substituição. Outro ponto que apresenta influência na magnitude deste fenômeno é a classe de resistência do concreto pois, para os autores, concretos de resistências mais baixas tendem a apresentar retrações maiores quando comparados com concretos de resistências mais elevadas, conforme é possível observar na Gráfico 4.

Tabela 7 – Compilação dos parâmetros mais avaliados em retração de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, adaptado de Lye *et al.* (2016).

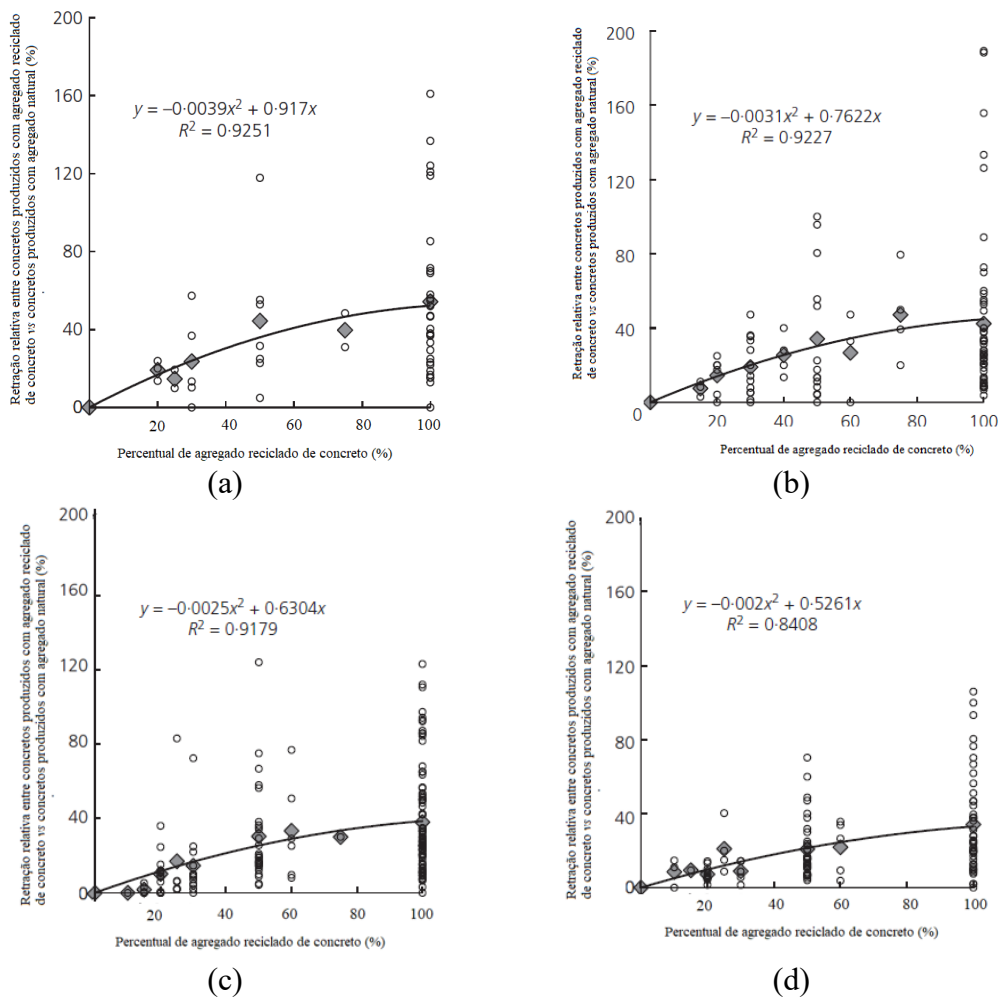
	Parâmetro	Variável mais estudada	Número de ensaios
Propriedades do RCA	Granulometria	Similar	29
	Agregado de origem	Similar	27
	Umidade	Saturada superfície seca	43
Método de ensaio		ASTM C 157 (2014)	19
Forma do corpo de prova		prismático	86
Método de cura	Método	Cura úmida	87
	Duração	De 1 a 14 dias	55
	Temperatura	Entre 20°C e 30°C	48
	Umidade Relativa	Entre 90% e 100%	89
Exposição (ensaio)	Idade da primeira leitura	1 dia	47
	Duração do ensaio	Entre 30 e 100 dias	47
	Temperatura do meio ambiente	Entre 20°C e 30°C	90
	Umidade Relativa do meio ambiente	Entre 41% e 60%	88

Para Fathifazl *et al.* (2011), o agregado graúdo, por representar grande parte do volume do concreto, irá influenciar significativamente no módulo de elasticidade do concreto e, por conta disso, ao substituir o agregado natural pelo reciclado, estas propriedades também serão

afetadas. Segundo Domingo-Cabo *et al.* (2009), na medida em que se aumenta o teor de substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto o módulo de elasticidade reduz e, segundo os autores, tal fato ocorre em devido à elevada porosidade do agregado reciclado.

É possível observar na Gráfico 4 que apesar de haver uma tendência no aumento da retração na medida em que aumenta o teor de substituição, ao avaliar entre teores, é possível observar que há uma elevada dispersão entre os valores de um mesmo teor de substituição. No Gráfico 4 (a) é apresentada relação entre o aumento do teor de substituição do NA por RCA para concretos compreendidos na faixa de resistência de 10 a 25 MPa, no Gráfico 4 (b) para concretos na faixa de resistência na faixa de 25 a 32 MPa, no Gráfico 4 (c) para a faixa de resistência de 32 a 40 MPa e no Gráfico 4 (d) para a faixa de resistência compreendida na faixa de 40 a 50 MPa.

Gráfico 4 – Relação percentual da retração de concretos produzidos com substituição de agregado natural por agregado reciclado, Lye *et al.* (2016).

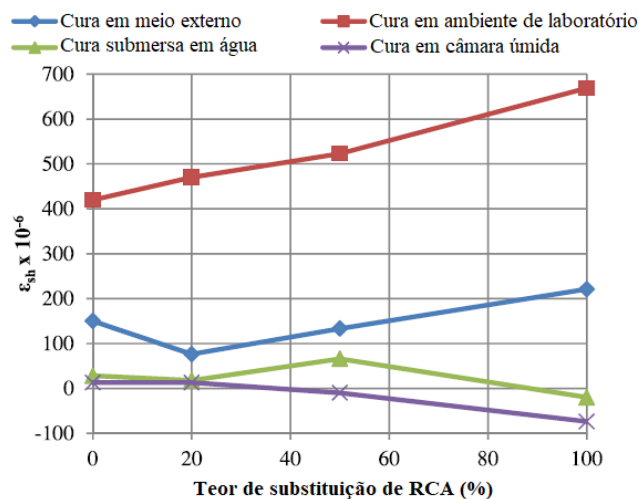


É possível observar na Gráfico 4 (d) que Lye *et al.* (2016) indica a Equação 3 para correlacionar a retração do concreto de referência de classe de resistência compreendido na faixa de 40 a 50 MPa com os respectivos concretos produzidos com agregados reciclado.

$$y = -0,002x^2 + 0,5261x \therefore R^2 = 0,8408 \quad (3)$$

Outro fator importante a se observar é que a realização de ensaios de retração em laboratório faz com que os valores de magnitude da retração encontrados sejam superiores aos valores obtidos em ensaios realizados em outros meios ambientes. Isso ocorre devido ao fato de a umidade relativa encontrada em laboratório ser na ordem de 60%, o que torna o ambiente altamente seco, Silva et al. (2015). Segundo Silva et al. (2015), este fato é o responsável por acentuar as elevadas deformações que ocorrem nos concretos com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, conforme resultados apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Retração em concretos reciclados de RCA curados em diferentes meios ambiente, Silva et al. (2015).



Assim, através da análise de regressões múltiplas dos valores avaliados de retração em concretos com substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto, Lye *et al.* (2016) apresenta a Equação 4, abaixo. Esta equação aponta a retração percentual relativa (%) de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto, utilizando como valores de entrada a resistência do concreto em análise, a umidade relativa do meio no qual este será exposto e o teor de substituição do NA pelo RCA.

$$Rel_{\varepsilon} = \frac{RH_0}{RH} \times \frac{f_{cmo,cubo}}{f_{cm,cubo}} \times (-0,0054 \times C_{RCA}^2 + 1,43 \times C_{RCA}) \quad (4)$$

Onde:

Rel_{ε} é a retração relativa do concreto produzido com RCA em relação ao concreto produzido com agregado natural (%);

RH_0 é igual a 100%;

RH é a umidade relativa do meio ambiente em análise (%);

$f_{cmo,cubo}$ é igual a 10MPa;

$f_{cm,cubo}$ é a resistência do cubo do concreto em análise (%);

C_{RCA} é o teor de substituição do agregado natural pelo RCA (%).

Debieb e Kenai (2008) e Gayarre *et al.* (2019), ao investigarem a influência da substituição do agregado natural por agregado reciclado de tijolo nas propriedades do concreto, os autores concluíram que na medida em que se aumenta o teor de RMA a retração também aumenta, de modo que para o teor de 100% de RMA a retração pode chegar a ser duas vezes e meia superior a retração do concreto convencional.

Quanto ao módulo de elasticidade, Debieb e Kenai (2008) e Gayarre *et al.* (2019) apontam que na medida em que se aumenta o teor de agregado reciclado o módulo de elasticidade reduz.

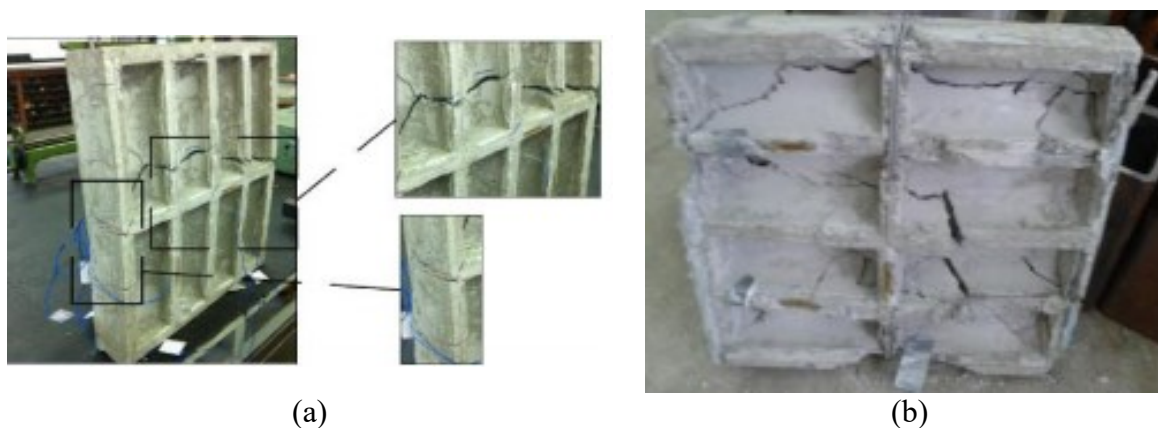
1.3. Abertura de fissuras em lajes de concreto

A abertura de fissuras em lajes de concreto armado deve ser controlada pois, caso estas fissuras apresentem aberturas acentuadas estas aberturas servirão como janelas de entrada de agentes agressivos para o interior do elemento estrutural, proporcionando as condições ideais para o surgimento de patologias.

Em caso de lajes armadas em uma direção, na direção da armadura principal, fissuras provenientes do carregamento irão surgir e a retração irá causar um pequeno aumento na espessura da fissura. Porém, na direção do maior vão, na qual comumente é adotada a armadura mínima, as fissuras de retração podem levar a formação de acentuada de fissuras, GILBERT (1992).

Teixeira *et al.* (2016), ensaiou lajes armadas em duas direções ($L_y/L_x \approx 1,0$) confeccionada com substituição de 50% do agregado miúdo natural por agregado miúdo produzido de resíduo de construção e demolição (RCD). Os autores apontaram que a laje confeccionada com entulho apresentou deformações no concreto e no aço superiores às deformações apresentadas pela laje de referência, chegando a apresentar deformações 3 vezes maiores que a laje de referência. Outro ponto importante observado por Teixeira *et al.* (2016) foi o padrão de fissuração apresentado pela laje produzida com RCD, esta apresentou fissuração generalizada ao passo que a laje de referência apresentou uma única fissura, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Detalhe da ruptura da (a) laje de referência e (b) laje produzida com RCD, Teixeira *et al.* (2016).



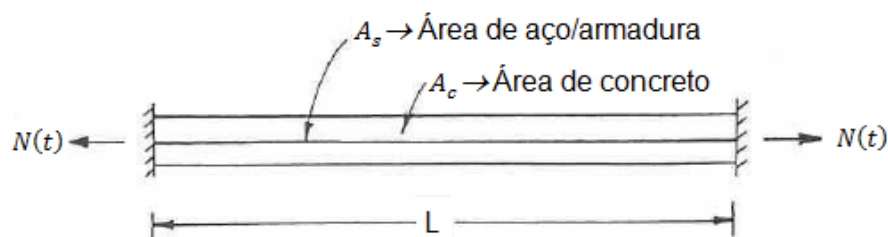
Tal fato indica que as propriedades do concreto produzido com agregados reciclados podem influenciar no processo de fissuração de lajes. Diante do apresentado, faz-se necessário a investigação do processo de abertura de fissuras decorrentes da retração nas lajes produzidas em concreto com resíduos.

1.3.1. Modelo de cálculo da abertura de fissuras por retração (Gilbert, 1992; Gilbert e Nejadi, 2004)

Conforme visto anteriormente, a retração, através dos seus mecanismos, faz com que o concreto gradualmente reduza de volume ao longo do tempo. Assim, na medida em que o elemento em concreto armado hiperestático se retrai surgem esforços internos de tração no elemento, conforme pode ser observado na Figura 4.

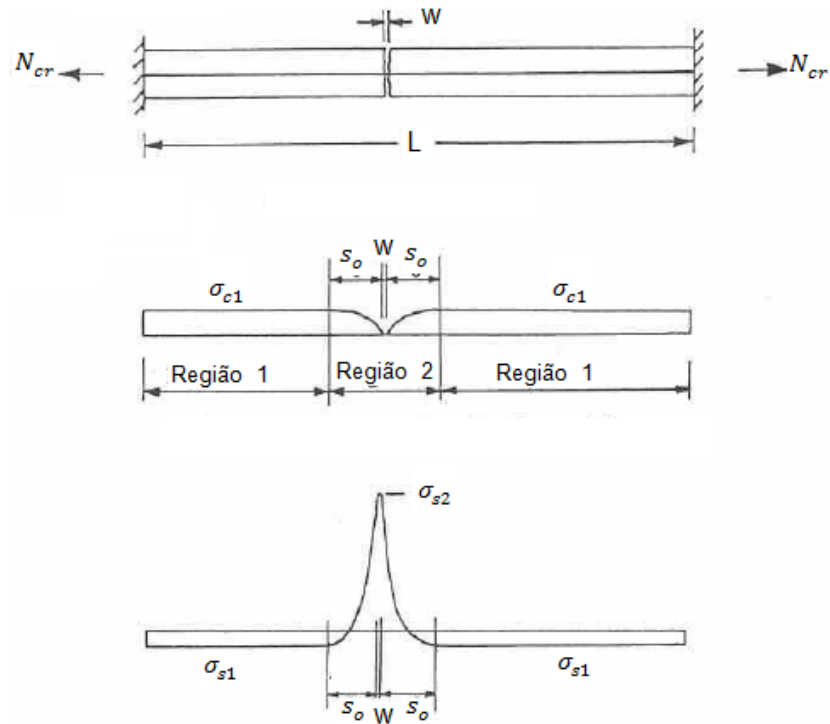
A retração induz no concreto uma tensão de tração, σ_{cl} , e na armadura uma tensão de compressão, σ_{s1} , pois esta exerce uma restrição o movimento do concreto. Assim, na medida em que a retração se desenvolve estas tensões também evoluem, (GILBERT, 1992; GILBERT e NEJADI, 2004).

Figura 4 – Elemento de concreto armado antes do surgimento da primeira fissura, Gilbert (1992).



O elemento de concreto armado resiste a este esforço, $N(t)$, até o momento no qual a magnitude da retração induz uma força superior a capacidade resistente da matriz cimentícia e, a partir deste momento surge a primeira fissura no elemento. Por conta disto, longe da posição da fissura, região 1, o concreto permanece tracionado, mas na medida em que se aproxima da região da fissura, a tensão no concreto varia parabolicamente ao longo do comprimento s_0 ($d_b/10\rho$) até assumir o valor de zero nesta posição da fissura, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Primeira fissura em um elemento de concreto armado com deslocamento restringido, Gilbert (1992).



Assim, utiliza-se as Equações 5 e 6 para determinar os esforços atuantes na armadura.

$$\sigma_{s2} = \frac{N_{cr}}{A_s} \quad (5)$$

$$\sigma_{s1} = -C_1 \times \frac{N_{cr}}{A_s} \quad \therefore C_1 = \frac{(2s_o)}{(3L - 2s_o)} \quad (6)$$

Já no concreto, é utilizada a Equação 7.

$$\sigma_{c1} = \frac{N_{cr}(1 + C_1)}{A_c} \quad (7)$$

A condição limite para o surgimento da primeira fissura de retração de um elemento em concreto armado, desconsiderando a influência do carregamento, é aquela em que as deformações decorrentes da retração e da fluência, somadas, são iguais a deformações de tração do concreto, conforme descrito na Equação 8 (GILBERT, 1992; GILBERT e NEJADI, 2004).

$$\epsilon_c + \epsilon_{sh} = \epsilon_{c,t} \quad (8)$$

Onde:

- ϵ_c é a deformação devido à fluência;
- ϵ_{sh} é a deformação devido à retração;
- $\epsilon_{c,t}$ é a deformação à tração do concreto.

Por outro lado, a deformação limite associada a resistência à tração do concreto é dada pela Equação 9.

$$\epsilon_{c,t} = -\frac{f_t}{E_c} \quad (9)$$

Onde:

- f_t é a resistência do concreto à tração;
- E_c é a módulo de elasticidade do concreto;

Assim, substituindo a Equação 9 na Equação 8, é possível determinar magnitude da deformação limite em que a retração e fluência podem atingir para que o concreto fissure, Equação 10.

$$\epsilon_c + \epsilon_{sh} = \frac{f_t}{E_c} \quad (10)$$

Compatibilizando as deformações no elemento, através da Equação 11, é possível determinar a força crítica N_{cr} para que surja a primeira fissura decorrente das deformações impostas pela retração.

$$N_{cr} = \frac{+n \times f_t \times \rho \times A_c}{C_1 + n \times \rho \times (1 + C_1)} \quad (11)$$

Onde:

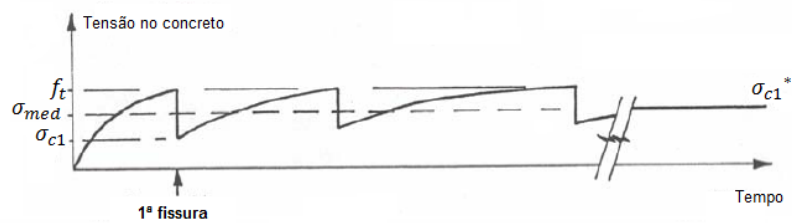
$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_c}$$

$$A_s = \rho \times A_c$$

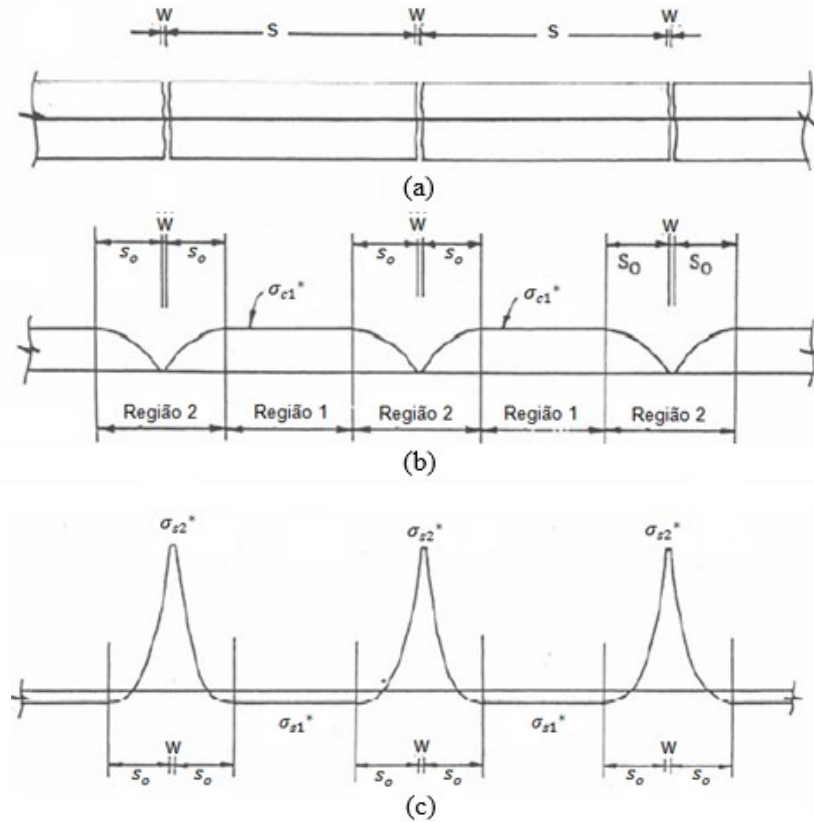
Após o surgimento da primeira fissura, a tensão no concreto é aliviada ao valor de σ_{c1} , indicado na Figura 6, o que torna o elemento menos rígido. Como a retração e a fluência são fenômenos que se desenvolvem ao longo do tempo, estes fenômenos levam ao surgimento de múltiplas fissuras no concreto. Sobre a ótica da tensão atuante na matriz cimentícia, após o surgimento da primeira fissura, a tensão no concreto diminui e assume o valor de σ_{c1} . Contudo, devido ao fato destes fenômenos evoluírem ao longo do tempo, a tensão no concreto retorna a subir até que ela atinja novamente a tensão resistente e uma nova fissura se forma.

Figura 6 – Desenvolvimento das tensões no concreto ao longo do tempo, Gilbert e Nejadi (2004).



Conforme pode ser observado na Figura 7, após a estabilização da retração, o esforço de tração atuante no concreto decorrente da retração assume o valor de $N(\infty)$ e o elemento apresenta m fissuras. Ainda na Figura 7, é possível constatar que a tensão atuante na armadura na região não fissurada assume o valor de σ_{s1}^* , ao passo que na posição da fissura a tensão no aço assume o valor de σ_{s2}^* . Já para a matriz cimentícia, a tensão atuante no concreto, distante o suficiente da fissura, não sofrer influência da fissura e assume o valor de σ_{c1}^* .

Figura 7 – (a) Elemento com múltiplas fissuras após a estabilização da retração, (b) tensões atuantes no concreto do elemento e (c) tensões atuantes na armadura



Para determinar o esforço atuante no elemento, $N(\infty)$, proveniente da deformação imposta pela retração ao final do seu desenvolvimento, ϵ_{sh}^* , é utilizada a Equação 12.

$$N(\infty) = -\frac{A_s \times n^*}{C_2} (\sigma_{med} + \epsilon_{sh}^* \times E_e^*) \quad (12)$$

Onde:

$$n^* = \frac{E_s}{E_e^*}$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{c1} + f_t}{2}$$

$$E_e^* = \frac{E_c}{(1 + \varphi^*)}$$

$$C_2 = \frac{(2s_0)}{(3 \times s - 2s_0)}$$

O coeficiente de fluência final, φ^* , é um fator que depende de diversos fatores, segundo Gilbert e Nejadi (2004), este valor pode assumir valores entre 2 e 4. Já o ACI 209.2R (2008), aponta que em condição padrão pode adotar o valor de 2.35 e, para as demais condições, o código aponta que o valor deve ser corrigido através da Equação 13.

$$\varphi^* \approx \phi_u = 2,35 \times \gamma_c \quad (13)$$

Nesta equação proposta pelo ACI 209.2R (2008), o coeficiente de correção leva em consideração fatores como a umidade do meio ambiente, idade do carregamento, geometria do elemento e as propriedades do concreto na correção. O coeficiente γ_c pode ser determinado através da Equação 14.

$$\gamma_c = \gamma_{c,t0} \times \gamma_{c,RH} \times \gamma_{c,vs} \times \gamma_{c,s} \times \gamma_{c,\psi} \times \gamma_{c,a} \quad (14)$$

Onde:

$\gamma_{c,t0}$ é a idade de aplicação da carga;

$\gamma_{c,RH}$ é o coeficiente dependente da umidade relativa;

$\gamma_{c,vs}$ é o coeficiente dependente da relação entre o volume (V) a área superficial do espécime (S);

$\gamma_{c,s}$ é o coeficiente dependente do abatimento em mm do concreto, Slump;

$\gamma_{c,\psi}$ é o coeficiente dependente da quantidade percentual de agregado miúdo na massa de agregado utilizada no traço

$\gamma_{c,a}$ é o coeficiente dependente da quantidade de cimento utilizada em kg/m³;

Para determinar o coeficiente dependente da idade de aplicação da carga, $\gamma_{c,t0}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 15, onde t_0 é expresso em dias.

$$\gamma_{c,t0} = \begin{cases} 1,25 \times t_0^{-0,118} & \text{para cura umida} \\ 1,13 \times t_0^{-0,094} & \text{para cura a vapor} \end{cases} \quad (15)$$

Para determinar o coeficiente dependente da umidade relativa, $\gamma_{c,RH}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 16, onde h é a umidade relativa do meio ambiente expressa em decimal.

$$\gamma_{c,RH} = 1,27 - 0,67 \times h \text{ para } h \geq 0,40 \quad (16)$$

Para determinar o coeficiente dependente da relação V/S, $\gamma_{c,vs}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 17, onde V é o volume da peça em mm^3 e S é a área superficial da peça em mm^2 .

$$\gamma_{c,vs} = \frac{2}{3} \times (1 + 1,13 \times e^{\{-0,0213 \times (V/S)\}}) \quad (17)$$

Para determinar o coeficiente dependente do abatimento do concreto (Slump), $\gamma_{c,s}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 18, onde s é o Slump do concreto expresso em milímetros.

$$\gamma_{c,s} = 0,82 + 0,00264 \times s \quad (18)$$

Para determinar o coeficiente dependente do percentual de agregado miúdo no concreto, $\gamma_{c,\psi}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 19, onde ψ é o percentual de agregado miúdo presente na quantidade total de agregado do traço.

$$\gamma_{c,\psi} = 0,88 + 0,0024 \times \psi \quad (19)$$

Para determinar o coeficiente dependente da quantidade percentual de ar incorporado no concreto, $\gamma_{c,a}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 20, onde a a quantidade de ar incorporado expressa em porcentagem.

$$\gamma_{c,a} = 0,46 + 0,09 \times a \geq 1,0 \quad (20)$$

Para determinar as tensões na armadura metálica na Região 1, longe da fissura, utiliza-se a Equação 21 e a tensão na armadura na fissura após a estabilização da retração a Equação 22.

$$\sigma_{s1}^* = \frac{\sigma_{med} \times E_s}{E_e^*} + \epsilon_{sh}^* \times E_s \quad (21)$$

$$\sigma_{s2}^* = \frac{N(\infty)}{A_s} \quad (22)$$

Para determinar a tensão no concreto é necessário verificar se a tensão na armadura é inferior ou não a tensão de escoamento ($N(\infty) < f_{sy} \times A_s$) pois, no caso da armadura escoar ao longo da retração, o concreto não apresentará novas fissuras mas as existentes irão apresentar aberturas de ordem superior (GILBERT, 1992; NEJADI e GILBERT, 2004).

Assim, para o caso de a armadura metálica não ter alcançado a tensão de escoamento, utiliza-se a Equação 23 para determinar a tensão no concreto ao final da retração.

$$\sigma_{c1}^* = \frac{N(\infty)(1 + C_2)}{A_c} \leq f_t \quad \therefore C_2 = \frac{(2s_o)}{(3 \times s - 2s_o)} \quad (23)$$

Para determinar o espaçamento máximo (s) que pode ocorrer entre fissuras, Gilbert (1992) e Nejadi e Gilbert (2004) indicam a utilização da Equação 24. Segundo os autores, o número de fissuras (m) pode ser determinado através da relação entre o comprimento da peça pelo espaçamento entre fissuras ($m = L/s$).

$$s \leq \frac{2s_o \times (1 + \xi)}{3\xi} \quad \therefore \xi = \frac{-n^* \times \rho \times (\sigma_{med} + \epsilon_{sh}^* \times E_e^*)}{n \times \rho \times (\sigma_{med} + \epsilon_{sh}^* \times E_e^*) + f_t} \quad (24)$$

Para determinar a abertura que a fissura irá apresentar, Gilbert (1992) e Nejadi e Gilbert (2004) indicam a utilização da Equação 25.

$$w = - \left[\frac{\sigma_{c1}^*}{E_e^*} \times \left(s - \frac{2}{3} \times s_o \right) + \epsilon_{sh}^* \times s \right] \quad (25)$$

Caso a armadura tenha atingido a resistência de escoamento, a tensão no concreto deve ser determinada de acordo com a Equação 26, na qual ρ é a taxa de armadura efetiva (A_s/A_c).

$$\sigma_{s1}^* = \frac{n^* \times \rho \times f_{sy} + \epsilon_{sh}^* \times E_s}{1 + n^* \times \rho} \quad (26)$$

No caso de a armadura encontrar-se escoando, utiliza-se a Equação 27 para determinar a tensão no concreto e para determinar a magnitude da abertura da fissura utiliza-se a Equação 28.

$$\sigma_{c1}^* = \frac{f_{sy} \times A_s - \sigma_{s1}^* \times A_s}{A_c} \quad (27)$$

$$w = \frac{\sigma_{s1}^* \times (3L - 2s_o) + 2s_o \times f_{sy}}{3E_s} \quad (28)$$

De posse dessas formulações, Gilbert (1992) avaliou o processo de formação de fissuras de retração em lajes de concreto. Nesta obra, Gilbert (1992) variou a taxa de armadura, o diâmetro da barra e a resistência a tração do concreto e concluiu que as melhores taxas de armadura para combater as fissuras de retração são as taxas superiores a 0,60%.

Tal fato apresenta concordância com o apontado pelo ACI 224 (2001), o qual aponta que para esses casos devem ser utilizados taxas de armadura superiores a 0,60%. O ACI 318 (2014) aponta que para combater a fissuração o ideal é que a armadura apresente espaçamentos menores e homogêneos.

2. MODELOS NORMATIVOS

Neste capítulo serão apresentados os modelos de cálculo da retração indicados pela norma ABNT NBR 6118 (2014) e pelos códigos CEB-fip (2010), EUROCODE 2 (2004) e o ACI 209.2R (2008). Estes modelos serão utilizados para avaliar a conformidade entre o que é previsto pelos modelos com os valores encontrados experimentalmente nos concretos produzidos para a retração autógena e para a retração por secagem. Adicionalmente, também serão apresentados os modelos de cálculo e as considerações adotadas por essas normas para a determinação da abertura de fissuras.

2.1. ABNT NBR 6118 (2014)

2.1.1. Determinação da retração de acordo com a NBR 6118 (2014)

A norma Brasileira ABNT NBR 6118 (2014) aponta a metodologia a qual deve ser seguida para avaliar a magnitude da retração em elementos de concreto. Deve-se destacar que nesta norma, ao contrário dos códigos internacionais, não é ponderada a influência do tipo de cimento utilizado na confecção do concreto, como o caso do CEB-*fip* (2010) e do Eurocode 2 (2004), tão pouco a quantidade de cimento utilizada no traço, como no caso do ACI 209-2R (2008).

O modelo normativo brasileiro também não faz distinção em sua formulação entre a parcela da retração por secagem com a retração autógena, esta norma trata a retração de forma global podendo ser determinada através da Equação 29, abaixo.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} \times [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad \therefore \quad \varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \times \varepsilon_{2s} \quad (29)$$

Onde:

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ é o valor da retração entre os instantes t_0 e t ;

$\varepsilon_{cs\infty}$ é o valor final da retração;

ε_{1s} é o coeficiente dependente da umidade relativa do meio ambiente e da consistência do concreto;

ε_{2s} é o coeficiente dependente da espessura fictícia do elemento analisado;
 $\beta_s(t)$ ou $\beta_s(t)$ é o coeficiente relativo à retração, no instante t_0 ou t .

O coeficiente dependente da umidade relativa do meio ambiente (ε_{1s}), calculado conforme a Equação 30, além de ponderar a umidade do meio no qual o elemento de concreto se encontra este parâmetro também considera o Slump do concreto. Assim, para concretos que apresente Slump inferior a 5 cm o coeficiente deve ser minorado em 25%, já nos casos em que o concreto utilizado apresente abatimento superior a 9 cm este indicador deve ser majorado em 25%.

$$10^4 \cdot \varepsilon_{1s} = -8,09 + \left(\frac{U}{15}\right) - \left(\frac{U^2}{2284}\right) - \left(\frac{U^3}{133765}\right) + \left(\frac{U^4}{7608150}\right) \quad (30)$$

Onde:

U é o valor da umidade relativa do meio ambiente.

Para o caso do coeficiente dependente da espessura fictícia do elemento em concreto, este parâmetro leva em consideração na sua formulação a geometria do elemento (área de concreto e perímetro em contato com o ar) e a umidade do meio ambiente e é calculado conforme o indicado pela Equação 31.

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33 + 2h_{fic}}{20,8 + 3h_{fic}} \quad \therefore h_{fic} = \gamma \times \frac{2 \times A_C}{u_{ar}} \quad (31)$$

Onde:

h_{fic} é a espessura fictícia da peça;

γ é o coeficiente dependente da umidade relativa do meio ambiente;

A_C é a área da seção transversal da peça;

u_{ar} é o perímetro externo da seção transversal da peça em contato com o ar.

O coeficiente relativo à retração no tempo, $\beta_s(t)$, obtido através da Equação 32, leva consideração em sua formulação a idade fictícia do concreto.

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A\left(\frac{t}{100}\right)^2 + B\left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C\left(\frac{t}{100}\right)^2 + D\left(\frac{t}{100}\right) + E} \quad (32)$$

Onde os parâmetros **A**, **B**, **C**, **D** e **E** são obtidos da seguinte forma:

$$A = 40$$

$$B = 116h_{fic}^3 - 282h_{fic}^2 + 220h_{fic} - 4,8$$

$$C = 2,5h_{fic}^3 - 8,8h_{fic} + 40,7$$

$$D = -75h_{fic}^3 + 585h_{fic}^2 + 496h_{fic} - 6,8$$

$$E = -169h_{fic}^4 + 88h_{fic}^3 + 584h_{fic}^2 - 39h_{fic} + 0,8$$

A idade fictícia do concreto (t) leva em consideração a velocidade de endurecimento do cimento, através do coeficiente α (sendo indicado o valor de 1 para este coeficiente pela NBR 6118 (2014), e a temperatura do meio ambiente. Admitindo assim, que em ambientes mais quentes a idade fictícia do concreto seja superior a idade cronológica, já em ambientes mais frios esta idade é inferior a idade cronológica. Assim, para o cálculo da idade fictícia do concreto, a NBR 6118 (2014) indica a Equação 33 para a determinação deste parâmetro.

$$t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \Delta t_{ef,i} \quad (33)$$

Onde:

α é o coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento, sendo que, na falta de dados experimentais, o valor indicado pela NBR 6118 (2014) para este coeficiente é 1;

T_i é a temperatura média diária do meio ambiente;

$\Delta t_{ef,i}$ é a quantidade de dias na qual a temperatura T_i pode ser considerada constante.

2.1.2. Controle da abertura de fissuras de acordo com a NBR 6118 (2014)

A NBR 6118 (2014) aponta que elementos em concreto armado devem respeitar limites de abertura de fissuras, a qual depende da classe de agressividade do meio ambiente. Diante disto, os elementos de concreto armado em situação de serviço devem respeitar os critérios apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Exigências relativas ao controle da abertura de fissuras indicado pela NBR 6118 (2014).

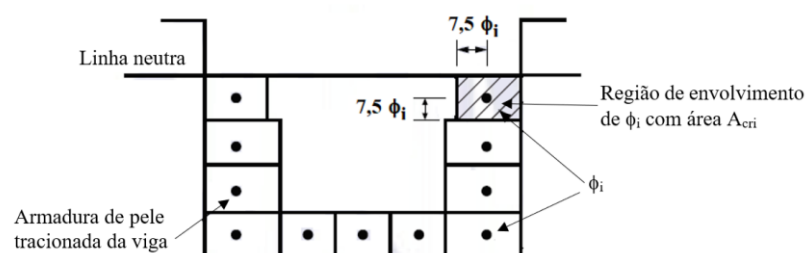
Tipo de concreto	Classe de agressividade ambiental	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	

De acordo com a NBR 6118 (2014), a magnitude da abertura das fissuras sofre influência de fenômenos que fazem com que a estrutura varie dimensionalmente, como o caso da retração. Para o código, a computação da influência deste fenômeno é difícil de ser ponderada nos cálculos de forma precisa.

Assim, de acordo com a NBR 6118 (2014) o modelo de cálculo apresentado na Equação 34 é indicado para avaliar o comportamento geral do elemento estrutural a ser analisado e este não garante a adequada avaliação de aberturas de fissuras referentes a fenômenos específicos, como o caso da retração.

Assim, para controlar a fissuração, a norma determina que deve ser considerada uma área crítica de concreto envolvente a barra, a qual apresenta uma abrangência que não diste mais do que $7,5\phi$ da barra, conforme pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Determinação da área crítica de concreto envolvente da armadura, NBR 6118 (2014).



Assim a abertura da fissura, w_k , pode ser determinada pelo menor valor apresentado entre as Equações 34 e 35.

$$w_k = \frac{\phi_i}{12,5\eta_1} \times \frac{\sigma_{s1}}{E_{si}} \times \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}} \quad (34)$$

$$w_k = \frac{\phi_i}{12,5\eta_1} \times \frac{\sigma_{s1}}{E_{si}} \times \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \quad (35)$$

Onde :

- $\phi_i, \sigma_{s1}, E_{si}, \rho_{ri}$ são definidos para cada área de envolvimento em exame;
- A_{cri} é a área da região de envolvimento protegida pela barra (Figura 8);
- E_{si} é o módulo de elasticidade da barra;
- ϕ_i é a bitola da barra utilizada;
- ρ_{ri} é a taxa de armadura passiva relativa à área da região de envolvimento;
- σ_{s1} é a tensão de tração no centro de gravidade da armadura avaliada;
- η_1 é o coeficiente de conformação superficial da barra utilizada

2.2. CEB-*fip* model code of 2010

2.2.1. Determinação da retração com o CEB-*fip* (2010)

Ao contrário do indicado pela NBR 6118 (2014), o comitê CEB-*fip* (2010) aponta que para obter o valor da retração é necessário determinar a parcela da retração por secagem, ε_{cds} , e a contribuição da porção da retração autógena, ε_{cas} . Assim, a retração calculada de acordo com o CEB-*fip* (2010) é determinada através da Equação 36.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (36)$$

Conforme já mencionado, o código Europeu leva em consideração no cálculo deste fenômeno o tipo de cimento empregado na confecção do concreto, conforme indicado na Tabela 9. O CEB-*fip* (2010) apresenta na sua metodologia de cálculo duas formas de calcular a retração. A primeira, de forma simplificada, é aplicada nos casos em que a temperatura do meio ambiente seja de 20°C. A segunda forma de calcular a retração, mais ampla, é aplicável nos casos em que a temperatura do concreto é diferente de 20°C. Através da Equação 37, o CEB-*fip* (2010) apresenta o conceito de maturidade, o qual é utilizado para corrigir a idade do concreto em função da temperatura apresentada pelo meio ambiente.

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right] \quad (37)$$

Onde:

t_T é a idade do concreto, em dias, ajustada em função da temperatura;

Δt_i é o número de dias no qual temperatura T prevalece;

$T(\Delta t_i)$ é a temperatura, em °C, que ocorre durante o período Δt_i .

Diante do exposto, será apresentado neste trabalho a formulação aplicável para o caso mais amplo, aqueles em que a temperatura é diferente de 20°C, pois este é o aplicável para esta pesquisa. Assim, para se determinar a retração autógena através do preconizado pelo CEB-*fip* (2010) utiliza-se a Equação 38.

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(t_T) \quad (38)$$

Assim, para se determinar a parcela da retração é necessário calcular o coeficiente de retração autógena, $\varepsilon_{cas0}(f_{cm})$, que leva em consideração a resistência média do cubo de concreto aos 28 dias e o coeficiente dependente do cimento, α_{as} , o qual varia de acordo com o tipo de cimento utilizado, conforme apresentado na Tabela 9. O coeficiente $\beta_{as}(t_T)$, obtido através da Equação 40, é utilizado para determinar o grau de evolução da retração em função do tempo.

$$\varepsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \cdot \left(\frac{f_{cm}/10}{6 + f_{cm}/10} \right)^{2.5} \cdot 10^{-6} \quad (39)$$

$$\beta_{as}(t_T) = 1 - \exp(-0.2 \cdot \sqrt{t_T}) \quad (40)$$

Para terminar a parcela da retração por secagem é utilizado a Equação 41.

$$\varepsilon_{cdsT}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH,T}(RH) \cdot \beta_{dsT}(t - t_s) \quad (41)$$

Nesta equação são apresentados os coeficientes de retração por secagem, $\varepsilon_{cds0}(f_{cm})$, o qual pode ser determinado através da Equação 42, o coeficiente que pondera a influência da umidade relativa do meio ambiente neste fenômeno, $\beta_{RH,T}(RH)$, é obtido através da Equação 43 e o coeficiente que descreve a evolução da retração no tempo é obtido através da Equação 44.

Tabela 9 – Coeficientes α_i usados no cálculo da retração, CEB-*fip* (2010)

Classe de resistência do cimento	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
32,5 N	800	3	0,013
32,5 R 42,5N	700	4	0,012
42,5 R 52,5N 52,5R	600	6	0,012

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6} \quad (42)$$

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \cdot \beta_{sT} \quad (43)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{\alpha_{sT}(T) + (t - t_s)} \right)^{0.5} \quad (44)$$

Onde:

$$\beta_{sT} = 1 + \left(\frac{4}{103 - RH} \right) \cdot \left(\frac{T - 20}{40} \right)$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] & \text{para } 40 \leq RH < RH_T \\ 0.25 & \text{para } RH \geq RH_T \end{cases}$$

$$\alpha_{sT}(T) = 0.035h^2 \cdot e^{[-0.06(T-20)]}$$

2.2.2. Controle da abertura de fissuras de acordo com o CEB-*fip* (2010)

O CEB-*fip* (2010) aponta que as aberturas limites de fissuras de elementos em concreto armado em serviço não devem apresentar aberturas superiores a depender da classe de agressividade.

Tabela 10 – Limites de abertura de fissuras de acordo com a classe de agressividade indicada pelo CEB-*fip* (2010).

	X0	XC	XD	XS	XF
Elementos em concreto armado	0,3 mm	0,3 mm	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm

X0 – Sem risco de corrosão ou ataques agressivos,

XC – Risco de corrosão induzida pela carbonatação,

XD – Risco de corrosão induzida por cloretos sem ser por ação de água marinha,

XD – Risco de corrosão induzida por cloretos por ação de água marinha,

XF – Agressividade por conta do ciclo de gelo e degelo.

De acordo com o CEB-*fip* (2010), a abertura de fissuras em elementos de concreto pode ser determinada através da Equação 45.

$$w_d = 2l_{s,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) \quad (45)$$

Onde:

w_d é a abertura da fissura;

$l_{s,max}$ é o comprimento no qual há o deslizamento relativo entre a armadura e o concreto;

ε_{sm} é a deformação média na armadura ao longo de $l_{s,max}$;

ε_{cm} é a deformação média no concreto ao longo de $l_{s,max}$;

ε_{cs} é a deformação no concreto proveniente da retração.

É possível observar que a equação do CEB-*fip* (2010) indicada para o cálculo da abertura da fissura, Equação 45, ao contrário da norma brasileira, apresenta de forma explícita em sua formulação a influência da magnitude da retração na abertura da fissura. Diante disto, para determinar a abertura da fissura, faz-se necessário determinar o comprimento $l_{s,max}$ e este pode ser determinado através da Equação 46.

$$l_{s,max} = k \times c + \frac{1}{4} \times \frac{f_{ctm}}{\tau_{bms}} \times \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \quad (46)$$

Onde:

- k é o coeficiente empírico, podendo ser assumido como 1,
 c é o cobrimento do concreto,
 f_{ctm} é a resistência do concreto à tração,
 τ_{bms} é a tensão média de aderência (Tabela 11),
 ϕ_s é o diâmetro da armadura utilizada,
 $\rho_{s,ef}$ é a taxa de armadura efetiva.

Para determinar a deformação relativa entre o concreto e o aço, o código CEB-*fip* (2010) indica a utilização da Equação 47.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \frac{\sigma_s - \beta \times \sigma_{sr}}{E_s} + \eta_r \varepsilon_{sh} \quad \therefore \sigma_{sr} = \frac{f_{ctm}}{\rho_{s,ef}} (1 + \alpha_e \times \rho_{s,ef}) \quad (47)$$

Onde:

- σ_s é a tensão na armadura na posição da fissura,
 σ_{sr} é a tensão máxima na fissura no momento de formação da fissura,
 β é o coeficiente determinado na Tabela 11,
 η_r é o coeficiente determinado na Tabela 11,
 α_e é a relação entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto (E_s/E_c);
 ε_{sh} é a deformação de retração;
 E_s é o módulo de elasticidade do aço;
 E_c é o módulo de elasticidade do concreto.

Tabela 11 – Valores para τ_{bms} , β e η_r para barras de aço de acordo com o CEB-*fip* (2010).

Tipo de carregamento	Estágio de formação da fissura	Estágio da fissura estabilizada
Curta duração, Carregamento instantâneo	$\tau_{bms} = 1,8 \times f_{ctm}(t)$ $\beta = 0,6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bms} = 1,8 \times f_{ctm}(t)$ $\beta = 0,6$ $\eta_r = 0$
Longa duração, Cargas repetidas	$\tau_{bms} = 1,35 \times f_{ctm}(t)$ $\beta = 0,6$	$\tau_{bms} = 1,8 \times f_{ctm}(t)$ $\beta = 0,4$

$$\eta_r = 0$$

$$\eta_r = 1$$

É possível observar na Equação 47 e na Tabela 11 que a parcela referente a retração só é considerada pelo código CEB-*fip* (2010) para o caso da determinação da abertura da fissura no estágio estabilizado para o caso de carregamentos de longa duração.

Todavia, faz-se importante ressaltar o fato deste código já apresentar a ponderação da retração na formulação referentes ao controle de abertura de fissuras.

2.3. EUROCODE 2 (2004)

2.3.1. Determinação da retração de acordo com o Eurocode 2

O Eurocode 2 (2004), assim como o CEB-*fip* (2010), considera em sua metodologia de cálculo que a retração total é a soma da parcela da retração autógena com a parcela da retração por secagem. Este código apresenta a Equação 48, na qual o coeficiente ϵ_{cs} representa a retração total, o coeficiente ϵ_{cd} representa a parcela da retração por secagem e o coeficiente ϵ_{ca} representa a parcela da retração autógena.

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad (48)$$

Diante disto, a parcela da retração autógena pode ser determinada através da Equação 49. Nesta Equação o coeficiente $\beta_{as}(t)$ representa a evolução da retração no tempo e pode ser calculado pela Equação 50, já o coeficiente $\epsilon_{as}(\infty)$ representa a magnitude da retração autógena no tempo infinito e pode ser determinado através da Equação 51.

$$\epsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \times \epsilon_{as}(\infty) \quad (49)$$

$$\epsilon_{as}(\infty) = 2,50 \times (f_{ck} - 10) \times 10^{-6} \quad (50)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \times t^{0,5}} \quad (51)$$

O código prevê que a temperatura pode influenciar na maturidade do concreto e, desta forma, para corrigir a influência da temperatura na idade do concreto utiliza-se a Equação 52.

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left(\frac{4000}{273+T(\Delta T_i)}\right)^{-13,65}} \times \Delta T_i \quad (52)$$

Onde:

- t_T é a idade corrigida do concreto;
 $T(\Delta T_i)$ é a temperatura do concreto em °C no período de ΔT_i dias;
 ΔT_i é o número de dias em que a temperatura T ocorre.

Para determinar a magnitude da retração por secagem, o Eurocode 2 (2010) apresenta a Equação 53.

$$\varepsilon_{cd} = \beta_{ds}(t, t_s) \times k_h \times \varepsilon_{cd,0} \quad (53)$$

Na equação apresentada, $\beta_{ds}(t, t_s)$ é o coeficiente que correlaciona o tempo no qual o elemento se encontra exposto ao meio com a retração por secagem, este apresentado na Equação 51. Já o coeficiente k_h é o coeficiente dependente que depende da forma do elemento. Para se determinar o valor do coeficiente k_h , o Eurocode 2 (2010) apresenta a Tabela 12

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04 \times \sqrt{h_0^3}} \quad (54)$$

Na qual:

- t é a idade do concreto no momento em questão (dias);
 t_s é a idade do concreto no momento do início do processo de secagem (dias);
 h_0 é o coeficiente dependente da geometria do elemento estudado, $2Ac/u$ (mm).

Tabela 12 – Valores a serem utilizados para o coeficiente k_h , Eurocode 2 (2010)

h_0	k_h
100	1,00
200	0,85

300	0,75
≥ 500	0,70

Para se determinar o coeficiente básico da retração por secagem, $\varepsilon_{cd,0}$, o Eurocode 2 (2010) apresenta a Equação 55. Esta equação levada em consideração em sua formulação a resistência a compressão do concreto. Já os coeficientes α_{ds1} e α_{ds2} , presentes na Equação 55, são parâmetros que representam a velocidade de secagem do cimento utilizado no traço. Já o coeficiente β_{RH} , pondera-se a influência da umidade relativa do meio ambiente na retração.

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times e^{(-\alpha_{ds2} \times \frac{f_{cm}}{f_{cm0}})} \right] \times 10^{-6} \times \beta_{RH} \quad (55)$$

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

Em que:

α_{ds1} é o coeficiente dependente do tipo de cimento (Tabela 13);

α_{ds2} é o coeficiente dependente do tipo de cimento (Tabela 13);

f_{cm} é a resistência média a compressão do concreto (MPa);

f_{cm0} é assumido como 10MPa

RH é a umidade relativa do meio ambiente (%)

RH_0 é assumido como 100%

Tabela 13 – Valores dos coeficientes α_{ds1} e α_{ds2} , Eurocode 2 (2010)

Tipo de cimento	α_{ds1}	α_{ds2}
Classe S	3	0,13
Classe N	4	0,12
Classe R	6	0,11

2.3.2. Controle da abertura de fissuras de acordo com o Eurocode 2 (2004)

O Eurocode 2 (2004) aponta que em elementos de concreto em condição de serviço as aberturas das fissuras devem ser controladas e estas não devem apresentar aberturas superiores as permitidas pelas classes de agressividades. Conforme exposto na Tabela 14, o código europeu apresenta as seguintes limitações para as aberturas de fissuras em elementos de concreto armado.

Tabela 14 – Limitação da abertura máxima de fissuras para elementos em concreto armado de acordo com a classe de agressividade do meio ambiente, Eurocode 2 (2004).

Classe de agressividade	Elementos em concreto armado e protendido com cordoalhas não aderentes (Combinação quase permanente)
X0, XC1	0,40 mm
XC2, XC3, XC4	0,30 mm
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3	

X0 – Região sem risco de corrosão e livre de ataques,

XC – Regiões com risco de corrosão induzida pela carbonatação,

XD – Regiões com risco de corrosão induzida por cloretos,

XS – Regiões com risco de corrosão induzida por cloretos por conta da água marinha.

Ao comparar as aberturas de fissuras permitidas pelo CEB-*fip* (2010) com as aberturas do Eurocode 2, é possível verificar através da Tabela 10 e da Tabela 14, respectivamente, que o código Eurocode 2 (2004) permite a abertura de fissuras maiores que o código CEB-*fip* (2010).

O código reconhece a importância da retração e das variações volumétricas decorrentes de reações químicas na magnitude da fissuração e, para ele, estes fenômenos podem levar ao surgimento de fissuras acentuadas e devem ser evitadas. Todavia, segundo o Eurocode 2 (2004) esta análise não faz parte do escopo da norma. A norma aponta que a abertura da fissura em elementos de concreto armado pode ser determinada através da Equação 56.

$$w_k = S_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (56)$$

Onde:

w_k é a abertura de fissura;

$S_{r,max}$ é o espaçamento máximo entre fissuras;

ε_{sm} é a deformação média na armadura ao longo de l_s, \max
 ε_{cm} é a deformação média no concreto ao longo de l_s, \max .

É possível observar que a Equação 56 apresenta similaridades com a Equação 45 do CEB-*fip* (2010), entretanto, é possível verificar que na equação do Eurocode 2 (2004) não há a presença da parcela referente a retração.

Para o código, o deslizamento relativo entre o concreto e a armadura pode ser determinado através da equação:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \times \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \times (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \times \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (57)$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi^2 A_p}{A_{c,eff}}$$

Onde:

σ_s é a tensão na armadura na região da fissura;

α_e é a Relação entre E_s/E_{cm} ;

$\rho_{p,eff}$ é a taxa de armadura efetiva;

$f_{ct,eff}$ é a tensão média de tração do concreto no momento do surgimento da primeira fissura;

ξ é a relação da aderência entre a cordoalha e a armadura;

A_s é a área de aço da armadura;

A_s é a área de aço da armadura;

A_p é a área de aço da cordoalha;

$A_{c,eff}$ é a área de aço efetiva;

E_s é o módulo de elasticidade do aço;

k_t é o coeficiente dependente do tempo de duração da carga:

$k_t = 0,6$ para cargas de curta duração

$k_t = 0,4$ para cargas de longa duração

Para determinar a área efetiva de concreto envolvente da armadura, conforme ilustrado na Figura 9, o Eurocode 2 (2004) aponta que deve ser adotado o menor valor obtido das equações a seguir.

$$h_{c,ef} = \begin{cases} 2,5 \times (h - d) \\ (h - x)/3 \\ h/2 \end{cases}$$

Onde:

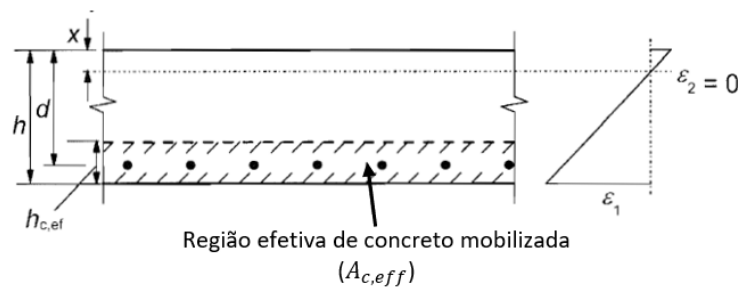
$h_{c,ef}$ é a altura efetiva de concreto;

h é a altura total do elemento;

d é a distância do centro de gravidade da armadura de tração até a face comprimida;

x é a profundidade da linha neutra.

Figura 9 – Área efetiva mobilizada em lajes Eurocode 2 (2004).



Para determinar o espaçamento máximo entre fissuras, $S_{r,max}$, é necessário verificar se a armadura se encontra dentro ou fora da região tracionada. Assim, caso as barras longitudinais apresentarem espaçamento menor ou igual a $5 \times (c + \phi/2)$, o Eurocode 2 (2004) determina que seja usada a Equação 58 para o cálculo do espaçamento entre fissuras mas, caso o espaçamento seja superior ao indicado, o Eurocode 2 (2004) determina que seja usada a Equação 59.

$$S_{r,max} = 3,4 \times c + \frac{0,425k_1 \times k_2 \times \phi}{\rho_{p,eff}} \quad (58)$$

$$S_{r,max} = 1,33 \times (h - x) \quad (59)$$

Onde:

ϕ é o diâmetro da barra;

c é o cobrimento da armadura;

k_1 é o coeficiente que depende da aderência da barra;

$k_1 = 0,8$ para barras de alta aderência (nervuradas);

$k_1 = 1,6$ para barras de superfície lisa;

k_2 é o coeficiente dependente da distribuição de tensões;

$k_1 = 0,5$ para regiões de momento;

$k_1 = 1,0$ para regiões puramente tracionadas.

2.4. ACI 209.2R (2008)

Para determinar a magnitude da retração o código ACI 209.2R (2008) indica que seja utilizada a Equação 56, abaixo.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t - t_c)^\alpha}{f + (t - t_c)^\alpha} \times \varepsilon_{shu} \quad \therefore f = 26,0 \times e^{\{1,42 \times 10^{-2} \times (V/S)\}} \quad (60.)$$

Onde:

$\varepsilon_{sh}(t, t_c)$ é a magnitude da retração por secagem no intervalo de tempo t-tc, em mm/mm;

t é a idade do concreto, em dias;

t_c é a idade em que se iniciou a secagem do concreto, em dias;

f é o coeficiente dependente relação entre o volume e a área superficial do espécime, no SI;

α é o coeficiente que descreve a curva de desenvolvimento ao longo do tempo, o ACI 209.2R indica $\alpha=1,0$ para descrever uma curva hiperbólica, adm.;

ε_{shu} é a retração última do concreto, em mm/mm;

V é o volume do espécime, em mm³;

S é a área superficial do espécime, em mm².

O código ACI 209.2R aponta que na ausência de valores específicos de retração para os agregados locais e com umidade relativa de 40% é possível de ser adotado o valor de 780×10^{-6} mm/mm para a retração última. Porém caso haja informações sobre as características dos materiais utilizados no concreto, as propriedades do concreto fresco, o código aponta que este valor pode ser corrigido através da Equação 57.

$$\varepsilon_{shu} = 780 \times \gamma_{sh} \times 10^{-6} \text{ mm/mm} \quad (61.)$$

Onde:

γ_{sh} é o coeficiente que corrige o valor da retração última;

Para a determinação do coeficiente de correção do valor da retração última, γ_{sh} , o ACI 209.2R indica a seguinte equação:

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \times \gamma_{sh,RH} \times \gamma_{sh,vs} \times \gamma_{sh,s} \times \gamma_{sh,\psi} \times \gamma_{sh,c} \times \gamma_{sh,a} \quad (62.)$$

Onde:

- $\gamma_{sh,tc}$ – Coeficiente dependente do tempo de cura;
- $\gamma_{sh,RH}$ – Coeficiente dependente da umidade relativa;
- $\gamma_{sh,vs}$ – Coeficiente dependente da relação entre o volume (V) a área superficial do espécime (S);
- $\gamma_{sh,s}$ – Coeficiente dependente do abatimento em mm do concreto, Slump;
- $\gamma_{sh,\psi}$ – Coeficiente dependente da quantidade percentual de agregado miúdo na massa de agregado utilizada no traço;
- $\gamma_{sh,c}$ – Coeficiente dependente da quantidade de cimento utilizada em kg/m³;
- $\gamma_{sh,a}$ – Coeficiente dependente do teor (%) de ar incorporado no concreto.

Para determinar o coeficiente dependente do tempo de cura, $\gamma_{sh,tc}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 59, onde t_c é expresso em dias.

$$\gamma_{sh,tc} = 1,202 - 0,2337 \times \log(t_c) \quad (63.)$$

Para determinar o coeficiente dependente da umidade relativa, $\gamma_{sh,RH}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 60, onde h é a umidade relativa do meio ambiente expressa em decimal.

$$\gamma_{sh,RH} = \begin{cases} 1,40 - 1,02 \times h & \text{para } 0,40 \leq h \leq 0,80 \\ 3,00 - 3,0 \times h & \text{para } 0,80 < h \leq 1,00 \end{cases} \quad (64.)$$

Para determinar o coeficiente dependente da relação V/S, $\gamma_{sh,vs}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 61, onde V é o volume da peça em mm³ e S é a área superficial da peça em mm².

$$\gamma_{sh,vs} = 1,20 \times e^{\{-0,00472 \times (V/S)\}} \quad (65.)$$

Para determinar o coeficiente dependente do abatimento do concreto (Slump), $\gamma_{sh,s}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 62, onde s é o Slump do concreto expresso em milímetros.

$$\gamma_{sh,s} = 0,89 + 0,00161 \times s \quad (66.)$$

Para determinar o coeficiente dependente do percentual de agregado miúdo no concreto, $\gamma_{sh,\psi}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 63, onde ψ é o percentual de agregado miúdo em relação à quantidade total de agregado do traço.

$$\gamma_{sh,\psi} = \begin{cases} 0,30 + 0,014 \times \psi & \text{para } \psi \leq 50\% \\ 0,90 + 0,002 \times \psi & \text{para } \psi > 50\% \end{cases} \quad (67.)$$

Para determinar o coeficiente dependente da quantidade de cimento utilizada no traço, $\gamma_{sh,c}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 64, onde c o consumo de cimento em kg/m³.

$$\gamma_{sh,c} = 0,75 + 0,00061 \times c \quad (68.)$$

Para determinar o coeficiente dependente da quantidade percentual de ar incorporado no concreto, $\gamma_{sh,a}$, o ACI 209.2R (2008) indica a utilização da Equação 65, onde a é a quantidade de ar incorporado expressa em percentagem.

$$\gamma_{sh,a} = 0,95 + 0,008 \times a \geq 1,0 \quad (69.)$$

2.5. ACI 224R (2001)

Para o ACI 224R (2001), sob o prisma da avaliação estrutural e do controle de fissuração, não há necessidade em separar a avaliação da retração por secagem dos outros fenômenos que fazem com que o concreto apresente variações volumétricas, com por exemplo a retração autógena e por carbonatação.

Segundo o código, a retração final normalmente atinge valores na ordem de 600 $\mu\epsilon$, mas, a capacidade resistente do concreto à tração admite deformações na ordem de 150 $\mu\epsilon$, ou menos. Assim, por conta das deformações impostas pela retração, as peças de concreto com deslocamento restringido irão fissurar.

O ACI 224R (2001) aponta a dificuldade em se obter previsões da magnitude da retração com base em ensaios laboratoriais pois estes são realizados em um espaço curto de tempo e, por consequência, pode haver uma variabilidade dos resultados de longo prazo de aproximadamente 20%.

Para o código, as seguintes medidas preventivas devem ser tomadas para minimizar a tendência de fissuração das peças por conta da retração, como por exemplo:

- Controle do Slump do concreto;
- Controle da forma e tamanho do agregado;
- Uso de areia bem graduada e como o mínimo possível de finos passante na peneira 100 (#), isenta de argila e;
- Realização de procedimentos adequados de cura.

O uso de armaduras irá fazer com que se reduza o número de fissuras que irão ocorrer no concreto por conta da retração, como também irá minimizar a magnitude da abertura da fissura. De acordo com o código, o uso de armadura mínima em lajes, pisos e paredes de concreto, sendo que esta armadura mínima varia entre 0,18% a 0,20%, normalmente não irá combater a fissuração, de modo que as fissuras geralmente irão apresentar aberturas superiores aos limites preconizados. Assim, o ACI 224R (2001) recomenda que sejam adotadas taxas de armaduras superiores a 0,60%.

O ACI 224R (2001) aponta que o controle de fissuração se faz através da determinação da máxima abertura provável da fissura e a verificação da mesma frente aos limites de aceitação indicados pelo ACI 318 (1995). Todavia, o código aponta que a maioria das aberturas de fissuras encontradas *in loco* tendem a apresentar valores inferiores aos valores calculados. Por

outro lado, segundo o ACI 224R (2001), podem ocorrer em vigas fissuras isoladas de até duas vezes maiores que o computado.

Esta norma aponta que a máxima abertura provável deve ser calculada através da Equação 70, em concordância com o ACI 318 (1995).

$$w = 0,076 \times \beta \times f_s \sqrt[3]{d_c A} \times 10^{-3} \quad (70)$$

Na qual:

- w – Abertura da fissura, em in,
- d_c – Espessura do cobrimento da barra mais próxima a fibra mais tracionada, em in,
- f_s – Tensão na a armadura, em ksi,
- A – Área de concreto
- β – Razão entre a distância da linha neutra e a face tracionada e a distância da linha neutra com o eixo da armadura tracionada.

Todavia, quando considerado que a armadura se encontra em escoamento, f_s , a Equação 70 pode ser simplificada para a Equação 71.

$$w = 2,2 \times \beta \times \varepsilon_s \sqrt[3]{d_c A} \quad (71)$$

Entretanto, o ACI 318 (2014) no *item R24.4.2* aponta que, caso os elementos em concreto não exerçam impedimento às variações dimensionais decorrentes da retração e variação térmica, é possível a utilização da taxa de armadura mínima. Todavia, caso estes elementos exerçam impedimento às variações dimensionais, o código aponta que, para controlar a fissuração decorrente destes fenômenos, devem ser utilizados os modelos do PCI MNL 120 ou o indicado por Gilbert (1992).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Será descrito neste capítulo a metodologia utilizada neste trabalho experimental. Os ensaios para caracterização dos materiais utilizados neste trabalho foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, no Rio de Janeiro – RJ. Desta forma, este capítulo irá apontar os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos utilizados.

Também serão apresentados o método de dosagem dos concretos estudados, bem como os traços, os procedimentos de ensaios adotados na caracterização. As seguintes propriedades dos concretos foram determinadas experimentalmente: Abatimento, massa específica no estado fresco, teor de ar incorporado, resistência à compressão axial (nas idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias), módulo de elasticidade aos 28 dias de idade, resistência a tração indireta, retração por secagem e retração autógena.

Na Figura 10, são apresentados os concretos utilizados neste trabalho e na Tabela 15, são apresentadas as nomenclaturas adotadas para cada um dos concretos do estudo.

Figura 10 – Concretos utilizados no programa experimental

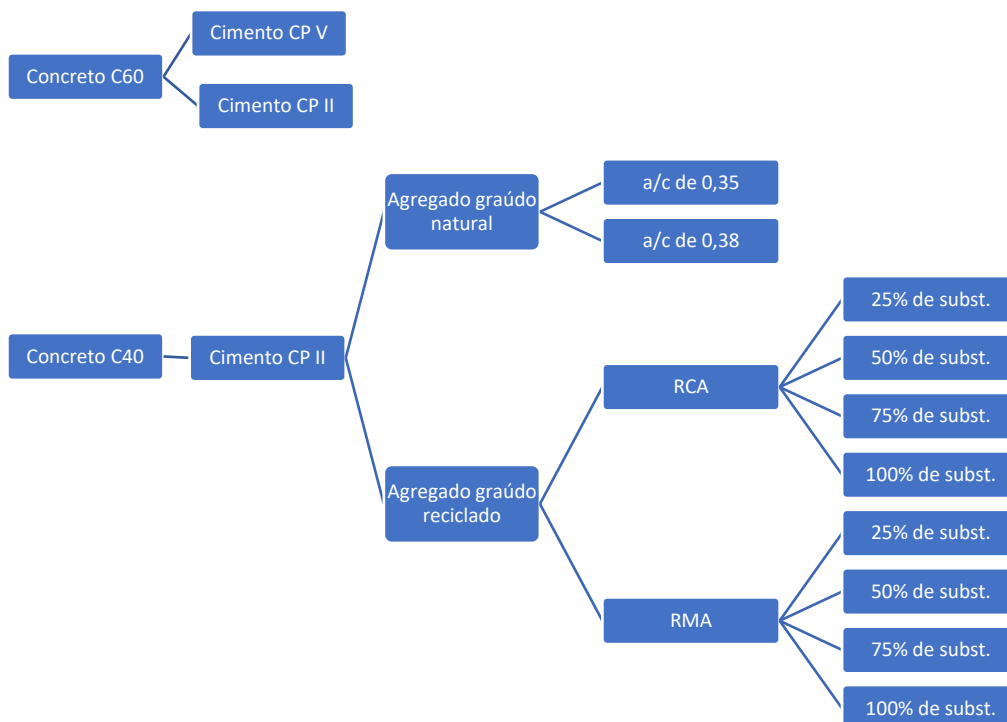


Tabela 15 – Nomenclaturas adotadas para cada um dos concretos

Traço	Nomenclatura
Concreto C60 com cimento CP V com a/c de 0,32	C60-ARI
Concreto C60 com cimento CP II com a/c de 0,32	C60-CP2
Concreto C40 com agregado graúdo natural e com a/c de 0,35	C40-M1
Concreto C40 com agregado graúdo natural e com a/c de 0,38	C40-M2
Concreto C40 com 25% de substituição do agregado graúdo natural por RCA com a/c de 0,38	25%RCA
Concreto C40 com 50% de substituição do agregado graúdo natural por RCA com a/c de 0,38	50%RCA
Concreto C40 com 75% de substituição do agregado graúdo natural por RCA com a/c de 0,38	75%RCA
Concreto C40 com 100% de substituição do agregado graúdo natural por RCA com a/c de 0,38	100%RCA
Concreto C40 com 25% de substituição do agregado graúdo natural por RMA com a/c de 0,38	25%RMA
Concreto C40 com 50% de substituição do agregado graúdo natural por RMA com a/c de 0,38	50%RMA
Concreto C40 com 75% de substituição do agregado graúdo natural por RMA com a/c de 0,38	75%RMA
Concreto C40 com 100% de substituição do agregado graúdo natural por RMA com a/c de 0,38	100%RMA

3.1. Caracterização dos materiais

3.1.1. Agregado miúdo

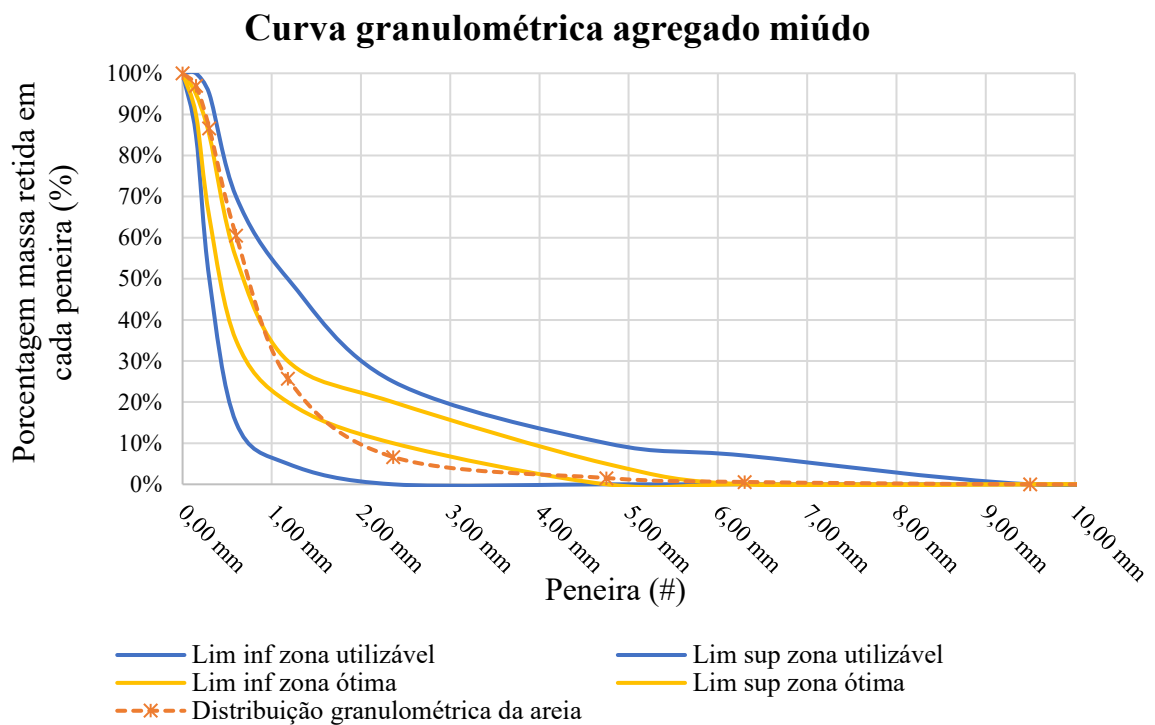
Para a fabricação dos concretos apontados anteriormente, utilizou-se areia natural lavada. Este material foi caracterizado no Laboratório de Engenharia Civil – LEC, na UERJ, de acordo com as seguintes normas vigentes: NBR 7217 (1987), NBR NM 52 (2009), NBR 7810 (1983), NBR 9776 (1987), NBR 7218 (2010), NBR NM 49 (2001).

A areia utilizada apresentou a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Características físicas da areia.

PENEIRAS		% Retida Média	% Retida Acumulada
nº	mm		
3/8"	9,5	0,00%	0,00%
1/4"	6,3	0,58%	0,58%
4	4,8	0,96%	1,54%
8	2,4	5,11%	6,65%
16	1,2	19,04%	25,69%
30	0,6	34,81%	60,65%
50	0,3	26,13%	86,63%
100	0,15	10,38%	97,01%
Fundo	<0,15	2,99%	100,00%

Gráfico 6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.



Assim, com base na distribuição apresentada pelo agregado miúdo natural, conforme consta na Tabela 16, o agregado natural apresentou a curva granulométrica disposta no Gráfico 6. Este material apresentou os valores apresentados na Tabela 17 para os índices físicos obtidos experimentalmente.

Tabela 17 – Índices físicos do agregado miúdo natural.

Índices físicos	
Módulo de finura	2,78
Dimensão máxima característica (mm)	4,8
Massa específica (g/cm ³)	2,53
Massa unitária (g/cm ³)	1,47
Absorção (%)	0,58

3.1.2. Agregado graúdo natural

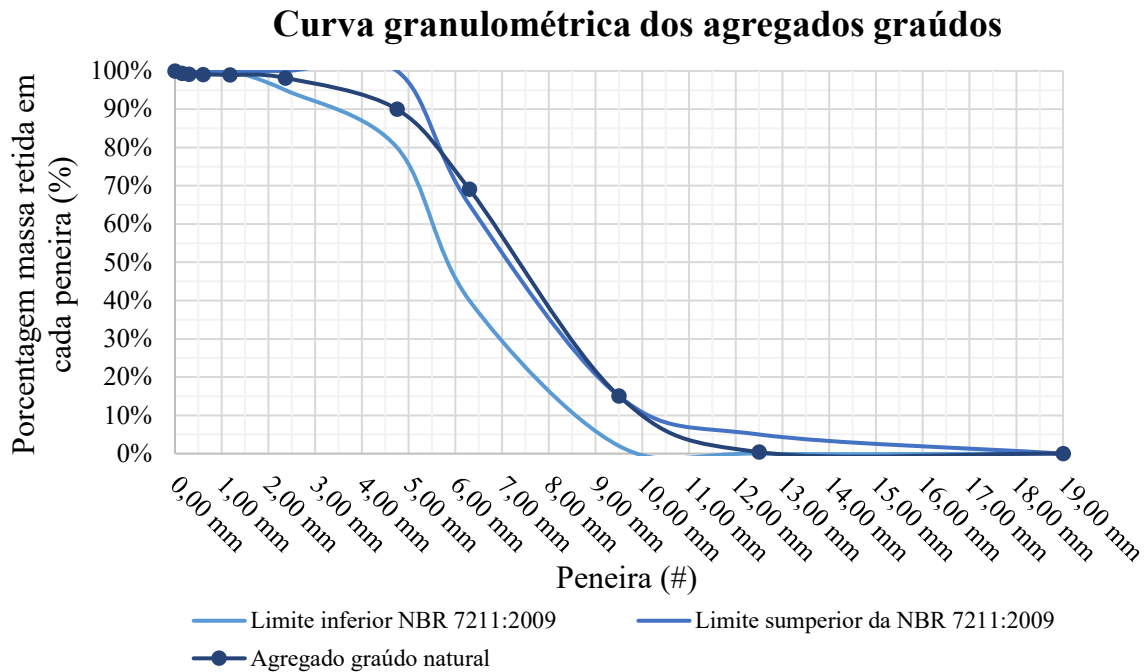
O agregado graúdo natural utilizado nesta pesquisa foi a brita que se encontra na zona granulométrica 4,75/12,5 (d/D), a qual foi caracterizada de acordo com as normas vigentes: NBR 7211 (2009), NBR 9939 (2011) NBR NM 53 (2009), NBR NM 45 (2006). Diante disto, o material natural utilizado apresentou a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 18

Tabela 18 – Granulometria do agregado graúdo natural

PENEIRAS n ^o	mm	% Retida Média	% Retida Acumulada
	19,00	0,00%	0,00%
	12,50	0,39%	0,39%
3/8"	9,5	14,66	15,05%
1/4"	6,3	54,02%	69,07%
4	4,8	20,92%	89,99%
8	2,4	8,18%	98,17%
16	1,2	0,79%	98,97%
30	0,6	0,07%	99,04%
50	0,3	0,10%	99,15%
100	0,15	0,25%	99,39%
Fundo	0	0,61%	100,0%

Assim, com base na granulometria apresentada pelo agregado graúdo natural, conforme consta na Tabela 18, este material apresentou a curva granulométrica disposta no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural.



Diante do apresentado, o agregado de RMA apresentou as propriedades dispostas na Tabela 19.

Tabela 19 – Índices físicos do agregado graúdo natural.

Índices físicos	
Módulo de finura	6,00
Dimensão máxima característica (mm)	12,50
Massa específica (g/cm ³)	2,49
Massa unitária (g/cm ³)	1,36
Absorção (%)	3,28

3.1.3. Agregado graúdo reciclado de concreto (RCA)

O agregado graúdo reciclado de concreto, utilizado nesta pesquisa, foi produzido no Laboratório de Engenharia Civil a partir dos cubos de concreto com procedência conhecida e com resistência à compressão de 40MPa. O material utilizado na produção do agregado graúdo de concreto foi o utilizado no ensaio de arrancamento (Pull-Out) realizado por Macedo (2018). Para melhorar o processo de produção do agregado reciclado, os cubos de concreto foram fragmentados em partes menores, conforme exposto na Figura 11.a. Posteriormente, o material

britado foi separado em faixas granulométricas, para então realizar a mistura adequada das frações granulométricas para então obter um agregado reciclado com uma composição granulométrica semelhante a composição granulométrica do agregado graúdo natural, conforme apresentado na Figura 11.b.

Figura 11 – Agregado graúdo de concreto reciclado, (a) produção e (b) execução da mistura do agregado de RCA na curva granulométrica.



(a)



(b)

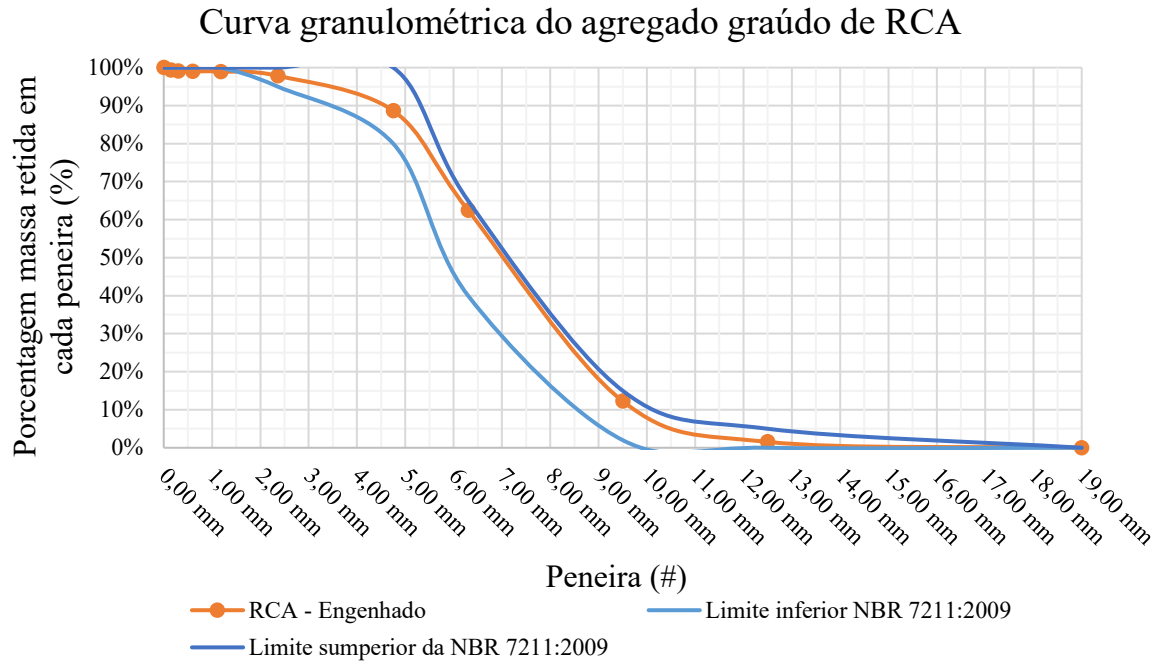
Assim, o agregado reciclado de concreto (RCA) foi caracterizado de acordo com as normas vigentes: NBR 7211 (2009), NBR 9939 (2011) NBR NM 53 (2009), NBR NM 45 (2006). O material reciclado de concreto a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Granulometria do agregado graúdo reciclado de concreto (RCA).

PENEIRAS nº	mm	% Retida Média	% Retida Acumulada
	19,00	0,00%	0,00%
	12,50	0,39%	1,54%
3/8"	9,5	14,66	12,25%
1/4"	6,3	54,02%	62,47%
4	4,8	20,92%	88,64%
8	2,4	8,18%	97,83%
16	1,2	0,79%	98,94%
30	0,6	0,07%	99,01%
50	0,3	0,10%	99,13%
100	0,15	0,25%	99,32%
Fundo	0	0,61%	100,00%

Assim, com base na granulometria apresentada pelo agregado graúdo natural, conforme consta na Tabela 20, este material apresentou a curva granulométrica disposta no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto.



Diante do apresentado, o agregado de RCA apresentou as propriedades dispostas na Tabela 21.

Tabela 21 – Índices físicos do agregado graúdo reciclado de concreto.

Índices físicos	
Módulo de finura	6,07
Dimensão máxima característica (mm)	12,5
Massa específica (g/cm ³)	2,24
Massa unitária (g/cm ³)	1,24
Absorção (%)	7,10

3.1.4. Agregado graúdo reciclado de tijolo (RMA)

Para a obtenção do agregado graúdo reciclado de tijolo, este foi produzido através da moagem de tijolos conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Agregado graúdo de reciclado de tijolo, (a) produção e (b) execução da mistura do agregado de RMA na curva granulométrica.



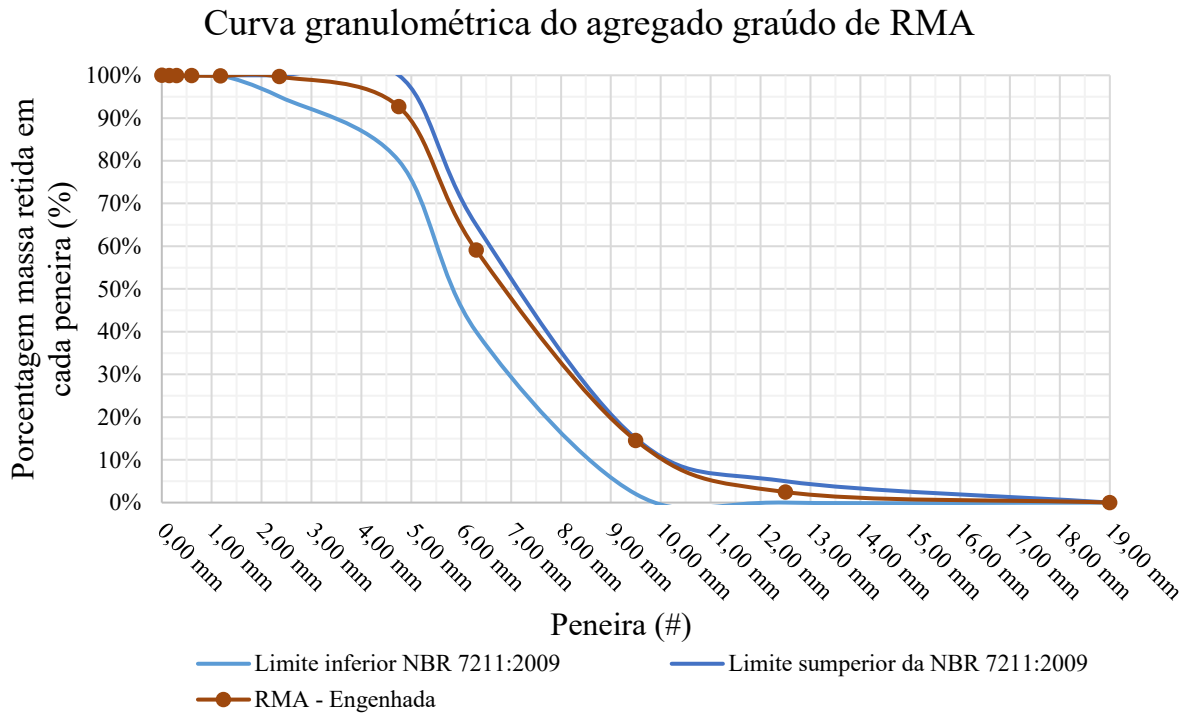
Diante da granulometria apresentada pelo agregado natural, o agregado reciclado de tijolo (RMA) foi produzido através da compatibilização da granulometria deste agregado utilizando com base a granulometria do agregado natural, Figura 12b. Assim, o agregado reciclado de concreto foi caracterizado de acordo com as normas vigentes (NBR – 7217; NBR – 7810; NBR – 9937; NBR – 7218 e NBR/NM – 49) e este apresentou as características físicas apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Granulometria do agregado graúdo reciclado de tijolo (RMA)

PENEIRAS n°	mm	% Retida Média	% Retida Acumulada
	19,00	0,00%	0,00%
	12,50	0,39%	2,47%
3/8"	9,5	14,66	14,54%
1/4"	6,3	54,02%	59,10%
4	4,8	20,92%	92,65%
8	2,4	8,18%	99,67%
16	1,2	0,79%	99,86%
30	0,6	0,07%	99,91%
50	0,3	0,10%	99,93%
100	0,15	0,25%	99,95%
Fundo	0	0,61%	100,0%

Assim, com base na granulometria apresentada pelo agregado reciclado de tijolo, conforme consta na Tabela 22, este material apresentou a curva granulométrica disposta no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado de tijolo.



Diante do apresentado, o agregado de RMA apresentou as propriedades dispostas na Tabela 23.

Tabela 23 – Índices físicos do agregado graúdo reciclado de tijolo.

Índices físicos	
Módulo de finura	5,95
Dimensão máxima característica (mm)	12,5
Massa específica (g/cm ³)	1,60
Massa unitária (g/cm ³)	0,87
Absorção (%)	25,74

3.1.5. Cimento

Na dosagem do concreto foi utilizado o Cimento Mauá CP II F-32 e Cimento Votorantim CP V – ARI.

3.1.6. Água

A água utilizada para amassamento da mistura foi água potável da rede de abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro – RJ.

3.1.7. Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado neste trabalho foi o Silicon ns MIX 400 da marca Silicon. O fabricante do aditivo superplastificante apresenta as seguintes propriedades para o aditivo utilizado:

Propriedades do aditivo superplastificante				
Recomendações	Dosagem	Aspecto/Cor	pH	Massa específica (g/cm ³)
Aditivo para a manutenção da plasticidade 200 min a 4h	480 ml – 1950 ml	Líquido translúcido/ mel claro	3,0 ± 1,0	1,04 ± 0,02

3.2. Dosagem do concreto

Conforme apresentado na Figura 10, foram utilizados 3 tipos de concretos. O primeiro deles, um concreto C60, foi obtido através do método MEHTA-AÏTCIN (1990)

A dosagem dos materiais foi realizada segundo o método descrito pela IPT-USP. Foi utilizada a resistência à compressão de 40 MPa. O consumo de materiais por metro cúbico de concreto e o traço em massa está resumido na Tabela 24.

Tabela 24 – Traços dos concretos de classe C60 e C40 utilizados no trabalho

Material	Traço 1 - C60		Traço 2 - C40		Traço 3 - C40	
	Cimento ARI e CP II		Consumo para 1 betonada	Consumo para 1 betonada	Consumo para 1 betonada	Consumo para 1 betonada
	Consumo para 1m ³	Consumo para 1 betonada				
Cimento	513,38	29,26	498,81 kg	28,43	480,47 kg	27,39 kg
Areia	661,05	37,68	847,98 kg	48,33kg	862,02 kg	49,14 kg
Brita	1025,35	58,44	897,86 kg	51,18 kg	898,07 kg	51,18 kg
Água	163,78	9,34	174,58 kg	9,95 kg	201,80 kg	10,41 kg
Superplastificante	5,10	290g	3,36 kg	192 g	3,36 kg	192 g
a/c	0,32		0,35		0,38	

Os traços com substituição do agregado gráudo natural pelo agregado gráudo reciclado de concreto e de tijolo utilizados ao longo de toda a pesquisa são os apresentados pela Tabela 25.

Tabela 25 – Traços utilizados com substituição do agregado natural pelo agregado reciclado para produção de 1 Betonada de 0,057m³.

Material	Traço base para 1 betonada (kg)	Agregado de RCA				Agregado de RMA			
		25% (kg)	50% (kg)	75% (kg)	100% (kg)	25% (kg)	50% (kg)	75% (kg)	100% (kg)
Cimento	27,39	27,39	27,39	27,39	27,39	27,39	27,39	27,39	27,39
Areia	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14	49,14
Agregado gráudo natural	51,18	38,39	25,60	12,80	-	38,39	25,60	12,80	-
Agregado gráudo reciclado	-	11,46	22,92	34,38	45,84	8,19	16,39	24,58	32,77
Água	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41	10,41
Superplastificante				0,192					
Fator a/c				0,38					

A fim de evitar distorções nos traços dos concretos produzidos com agregados reciclados, o agregado gráudo natural foi substituído pelo volume equivalente de agregado reciclado de concreto ou tijolo, através da utilização da Equação 1, indicada por Leite (2001).

3.2.1. Metodologia utilizada na mistura do concreto

O procedimento de mistura do concreto foi realizado de forma semelhante ao concreto confeccionado por Trindade (2017) e por Leite (2001), conforme apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Procedimento de mistura adotado.

Procedimento de confecção do concreto		
Etapa	Trindade (2017) e Leite (2001)	Realizado
1	Umedecimento da betoneira;	Umedecimento da betoneira;
2	Homogeneização dos agregados reciclados com água de pré-saturação por 1 minuto;	Homogeneização dos agregados reciclados com o agregado natural, com aproximadamente metade da água de amassamento durante 1 minuto;
3	Repouso por 10 minutos, com a betoneira desligada, para que os agregados absorvessem parte da água;	Repouso por 10 minutos, com a betoneira desligada, para que os agregados absorvessem da água de amassamento;
4	adição dos agregados graúdos naturais e da metade da água com homogeneização por 1 minuto;	Adição do cimento e mais 30% da água de amassamento, totalizando 80% da água. Esta parte foi homogeneizada por aproximadamente 1 minuto;
5	acréscimo do cimento e da outra metade da água com homogeneização por 30 segundos;	Com a betoneira em funcionamento, adicionou-se a areia e promoveu-se a homogeneização por mais 2 minutos;
6	adição da areia com homogeneização por 2 minutos.	Ao final, o restante da água foi adicionado gradualmente.

Ao contrário do realizado por Trindade (2017) e por Leite (2001), optou-se por não realizar a pré-saturação dos agregados reciclados pois, de acordo com o estudo realizado por Silva *et al.* (2015), a utilização do agregado reciclado na condição pré-saturada faz com que o concreto produzido apresente retração com magnitude superior a retração apresentada pelo mesmo concreto quando este é confeccionado com a simples compensação da água. Por conta disto, conforme descrito na Etapa 2 da Tabela 26, o agregado graúdo reciclado foi inserido na betoneira junto com os agregados naturais e com aproximadamente 50% da água de amassamento para serem submetidos ao processo de homogeneização.

3.3. Determinação das propriedades dos concretos produzidos

Para determinar as propriedades do concretos no estado fresco, foram realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump-test) – A determinação do abatimento do troco de cone do concreto foi conduzida de acordo com o especificado pela ABNT NBR NM 67 (1998).
- A determinação da massa específica e o teor de ar incorporado – A determinação desses parâmetros do concreto no estado fresco foi feita através da utilização da norma ANBT NBR 9833 (2008).

O ensaio de abatimento do concreto foi realizado em concordância com a NBR NM 67 (1998), em que antes da realização do ensaio os aparatos de ensaio foram lavados, o concreto foi disposto em 3 camadas no molde de ensaio, sendo que em cada uma das camadas foi realizada a compactação por meio de 25 golpes em cada uma das camadas com a haste de adensamento. Por fim, a superfície foi rasada e o molde foi retirado para que então fosse feita a leitura do abatimento, conforme Figura 13.

Figura 13 - Teste de abatimento "*slump test*"



Para a determinação da massa específica do concreto no estado fresco, e esta foi determinada de acordo com a NBR 9833 (2008), devido ao Slump apresentado pelo concreto, foi realizado adensamento por meio de vibração. Antes do enchimento do recipiente, este foi posto na balança com precisão de 0,05kg, o que, para a menor massa de concreto registrada esta apresentou precisão de 0,23%, inferior ao valor de 0,50% indicado pela norma, conforme pode ser observado na Figura 14 (a) e (b).

A determinação do teor de ar incorporado no concreto foi realizada de acordo com a metodologia de cálculo indicada pela NBR 9833 (2008) e os cálculos encontram-se no ANEXO A.

Figura 14 – Determinação da massa específica do concreto no estado fresco, (a) calibração da balança, (b) Leitura da massa específica do concreto no estado fresco.



(a)

(b)

Para caracterizar o concreto no estado endurecido, foram realizados os seguintes ensaios:

- Resistência à compressão axial – O ensaio de resistência à compressão diametral foi realizado de acordo com o especificado pela ABNT NBR 5739 (2018).
- Resistência à tração por compressão diametral – Para determinar a resistência à tração do concreto, foi realizado o ensaio de compressão diametral de acordo com o preconizado pela ABNT NBR 7222 (2011).
- Módulo de elasticidade secante – O módulo de elasticidade secante do concreto foi determinado em concordância com a ABNT NBR 8522 (2008).

Foram realizados ensaios de compressão axial nas idades de 7, 14 e 28 dias e para este ensaio, os corpos de prova foram retificados e submetidos ao carregamento de compressão axial a uma velocidade de carregamento conforme o indicado pela ABNT NBR 5739 (2018).

Figura 15 – (a) Corpo de prova retificado para a realização do ensaio de compressão axial, (b) Corpos de prova ensaiados à compressão axial.



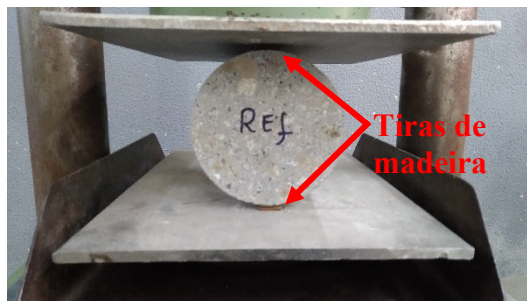
(a)



(b)

Foram realizados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral na idade de 28 dias e, para a realização destes ensaios os corpos de prova foram retificados, foram realizadas 2 leituras da altura e do diâmetro do corpo de prova, com um paquímetro digital com precisão de 0,01mm e, posteriormente foi determinado a altura média e o diâmetro médio e essas dimensões médias foram utilizadas na expressão de cálculo da resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$), conforme o indicado pela ABNT NBR 7222 (2011).

Figura 16 – Ensaio de compressão diametral.



Para a determinação do módulo de elasticidade secagem do concreto aos 28 dias, os corpos de prova foram previamente retificados antes da realização do ensaio, foi utilizado um compressômetro com base independente, conforme o indicado pela NBR 8522 (2008), equipado com relógios comparadores fixados diametralmente opostos, conforme . O ensaio foi conduzido de acordo com a Metodologia A indicada pela norma.

Figura 17 – Ensaio de módulo de elasticidade.



3.4. Metodologia de ensaio da retração por secagem

Para se determinar a magnitude da retração por secagem apresentada pelos concretos discriminados anteriormente, optou-se por utilizar a metodologia de ensaio proposta pela ABNT NM 131 (1997) e pela metodologia de ensaio da ASTM C157 (2017).

A ABNT NM 131 (1997) apresenta que as dimensões do corpo de prova (CP) prismático devem ser proporcionais ao tamanho da base de medida e ao tamanho máximo do agregado. Para ela, deve ser utilizado um corpo de prova prismático de 100x100x300mm no caso da utilização da base de medida de medida de 250mm e para concretos com agregados com dimensão máxima de 37,5mm. Já a ASTM C157 (2017) aponta que o CP prismático deve ser proporcional ao tamanho do agregado, de modo que devem ser utilizados prismas com dimensões de 75x75x285mm caso de todos os agregados (gráudos) passarem na peneira com 25,0 mm de malha.

Como os agregado utilizados neste trabalho não apresentam dimensão superior a 25,0mm optou-se por utilizar o corpo-de-prova prismático indicado pela ASTM C157 (2017), cujo o molde é ilustrado pela Figura 18a.

A confecção do dos espécimes foi feita em concordância com a ABNT NM 131 (1997) e com a ASTM C157 (2017), pois ao confeccionar os espécimes , foi realizada a primeira camada de concreto, esta vibrada em mesa vibratória e posteriormente a segunda camada de concreto foi realizada e vibrada, conforme pode ser observado na Figura 18(b).

Figura 18 – (a) Forma acrílica utilizada para a confecção dos corpos-de-prova prismáticos e (b) confecção da primeira camada de concreto dos corpos-de-prova



(a)



(b)

Após a moldagem dos CP prismáticos, estes devem ser encaminhados a um ambiente que apresente temperatura e umidade controladas, de modo que a temperatura do meio ambiente se encontre na faixa de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e a umidade relativa do meio ambiente não seja inferior a 95%, conforme pode ser visto na Figura 19. Após $24\text{h} \pm 30\text{ min}$ do início do processo de hidratação do cimento, os corpos de prova devem ser retirados da câmara úmida e desformados cuidadosamente para que então seja feita a primeira pesagem dos CP. Assim, após a desmoldagem, os espécimes devem ser submersos em um recipiente com água por 30 minutos, antes de se realizar a primeira leitura de comprimento (comprimento inicial).

Figura 19 – Corpos de prova de retração por secagem armazenados na câmara úmida com temperatura e umidade relativa controladas.



Após a realização da leitura de comprimento inicial, os corpos-de-prova devem ser submersos em água saturada com cal e reservados em um ambiente com temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até completarem a idade de 28 dias.

Ao completar a idade de 28 dias, os espécimes devem ser retirados da água saturada com cal para então ser realizada mais uma leitura de comprimento. Os CP devem ser mantidos em sala com temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $50\% \pm 4\%$. A frequência de leitura do comprimento dos CP prismáticos varia de acordo com a norma, pois a ABNT NM 131 (1997) aponta que devem ser efetuadas leituras com 3 dias, 7 dias, 28 dias, 56 dias, 3 meses, 9 meses e 12 meses após o início do processo de secagem. Já o código ASTM C157 (2017) aponta que as leituras devem ser realizadas nas idades de 4 dias, 7 dias, 14 dias, 28 dias, 8 semanas, 16 semanas, 32 semanas e com 64 semanas. Mediante ao apresentado, as leituras de

comprimento foram realizadas tanto nas idades preconizadas pela NM 131 (1997) quanto pela ASTM 157 (2017).

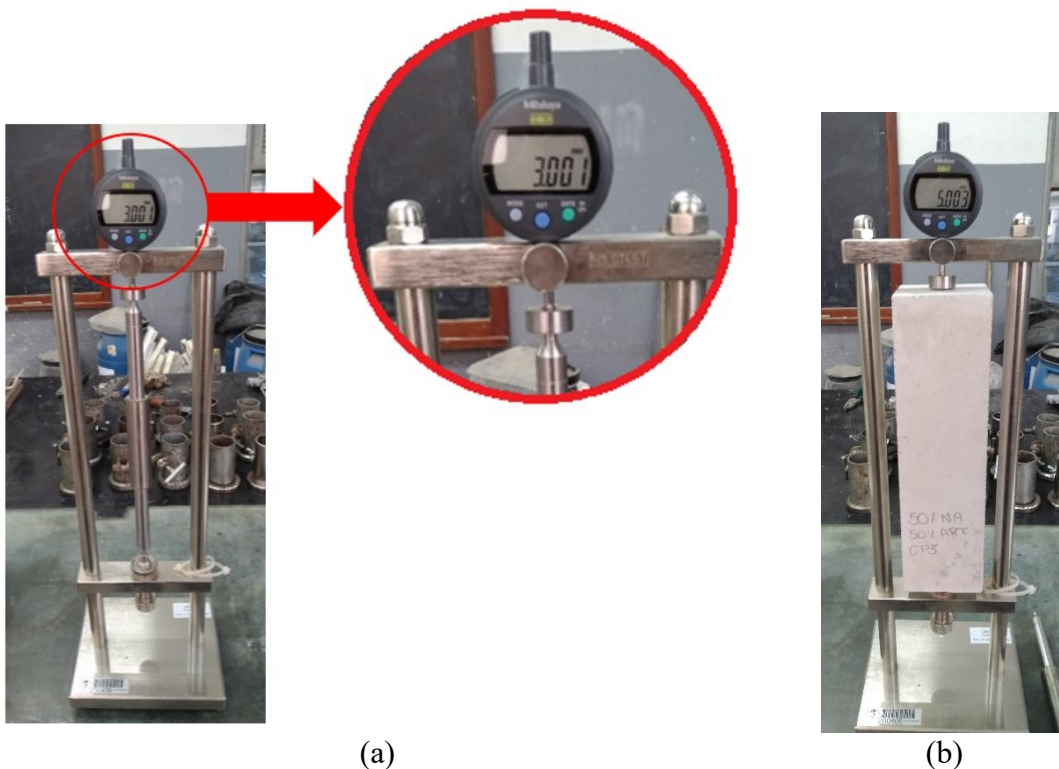
Mediante ao apresentado, a metodologia para a realização das leituras de comprimento apresentadas pelos espécimes avaliados foi:

1ª Etapa – Fixação do relógio comparador de precisão de $1\mu\text{m}/\text{m}$ no dispositivo de ensaio, Figura 20a;

2ª Etapa – Com o auxílio da barra de calibração, o relógio comparador é colocado na posição de referência relativa ao corpo de prova que será avaliado, Figura 20b;

3ª Etapa – Após a calibração do relógio comparador, o corpo de prova deve ser cuidadosamente colocado na posição de ensaio para que então seja realizada a leitura do comprimento do espécime.

Figura 20 – (a) Calibração do relógio comparador, fixado no aparato de ensaio, (b) leitura da variação do comprimento do espécime.



3.5. Metodologia de ensaio da Retração autógena

Os espécimes submetidos ao ensaio de retração autógena apresentam as dimensões de (75x75x285)mm, conforme o recomendado pela ASTM C157(2017). Para realizar o ensaio de retração autógena, a ABNT NM 131(1997) aponta que os CP destinados a este ensaio devem ser estocados em sala com umidade relativa do ar controlada na faixa de $50\% \pm 4\%$ e os corpos de prova devem ser cuidadosamente protegidos a fim de evitar a perda de umidade para o meio ambiente.

Para evitar a perda de umidade, a ABNT NM 131 (1997) aponta que os corpos-de-prova podem ser revestidos com borracha ou papel filme. No caso da utilização do papel filme, este deve ficar firmemente aderido no CP, devendo ser empregado ao menos 5 camadas de papel filme, evitando assim a perda de umidade para o meio ambiente.

Além de envolver os espécimes com papel filme, Formagini (2005) ao estudar a retração autógena em concretos e Balthar (2004) ao estudar a retração em pastas, aplicaram mais uma camada de fita aluminizada no corpo-de-prova para evitar que os CP percam umidade interna para o meio ambiente. Formagini (2005), apontou que a perda de massa média, decorrente da perda de umidade dos CP envelopados com papel filme e com a fita aluminizada foi de 0,01%, sendo assim considerada perfeita, já no trabalho de Balthar (2004) a perda de massa foi na ordem de 0,30%, também sendo considerada como boa.

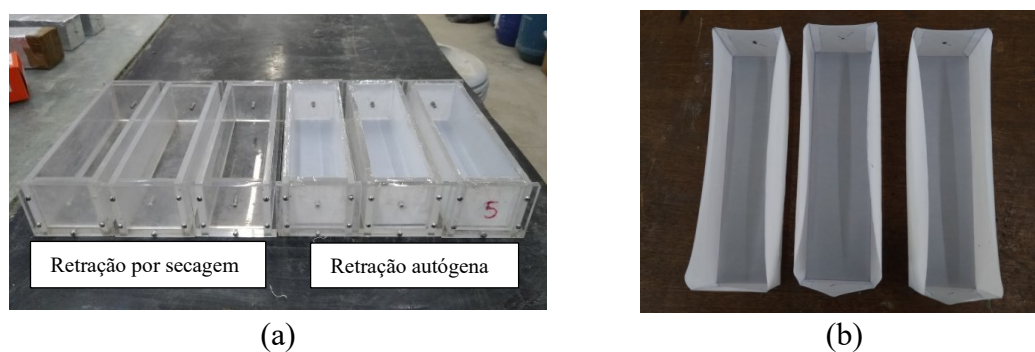
Dos espécimes destinados a avaliação da retração autógena, dois CP foram destinados a medição da variação da temperatura interna decorrente do calor de hidratação. Assim, a variação da temperatura interna do concreto e a temperatura do meio ambiente foram registradas através do uso do Termopar, sendo este ligado ao dispositivo de aquisição portátil da National Instruments.

As formas em acrílico destinadas à retração autógena foram usinadas de modo com que o pino de leitura pudesse ficar exposto para se realizar a leitura da variação de comprimento logo após o espécime completar seis horas após o início da hidratação do cimento. Os espécimes destinados a avaliação da retração autógena foram confeccionados simultaneamente aos espécimes destinados a avaliação da retração por secagem, conforme pode ser observado na Figura 21a.

Diferente da metodologia adotada na retração por secagem, na avaliação da retração autógena, inicialmente as leituras da variação de comprimento do espécime serão feitas com modelo dentro da forma e, para evitar que o movimento do corpo-de-prova seja restrito, uma

jaqueta de teflon com 0,2mm espessura foi utilizada para reduzir ao máximo as restrições ao movimento que a forma possa vir a exercer, conforme pode ser observado na Figura 21b.

Figura 21 – (a) formas de acrílicos usadas para o ensaio de retração por secagem e autógena e (b) Forma em teflon com 0,2mm confeccionadas para viabilizar o livre movimento do corpo-de-prova.



Diante disto, ao completar seis horas após o início do processo de hidratação do cimento, os relógios comparadores, com precisão de $1\mu\text{m}/\text{m}$, foram fixados horizontalmente nas extremidades do corpo de prova viabilizando a leitura da variação de comprimento nas primeiras 24h de idade do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 22a. Em paralelo as leituras de variação de comprimento realizadas através da utilização de relógios comparadores, foram também realizadas leituras de deformações no espécime nas primeiras 24h através da utilização de strain-gauge, conforme ilustrado na Figura 22b.

Conforme pode ser observado no estudo realizado por Silva e Lopes (2018), a utilização do extensômetros de temperatura auto compensável apresentou baixo coeficiente de variação (CV) que, quando comparado ao CV do extensômetro tipo Carlson, este instrumento apresentou valores de CV inferior ao Strain-Gauge tipo Carlson. Diante das vantagens econômicas apresentadas pelo extensômetro de temperatura compensada, este tipo de extensômetro foi o utilizado nesta pesquisa.

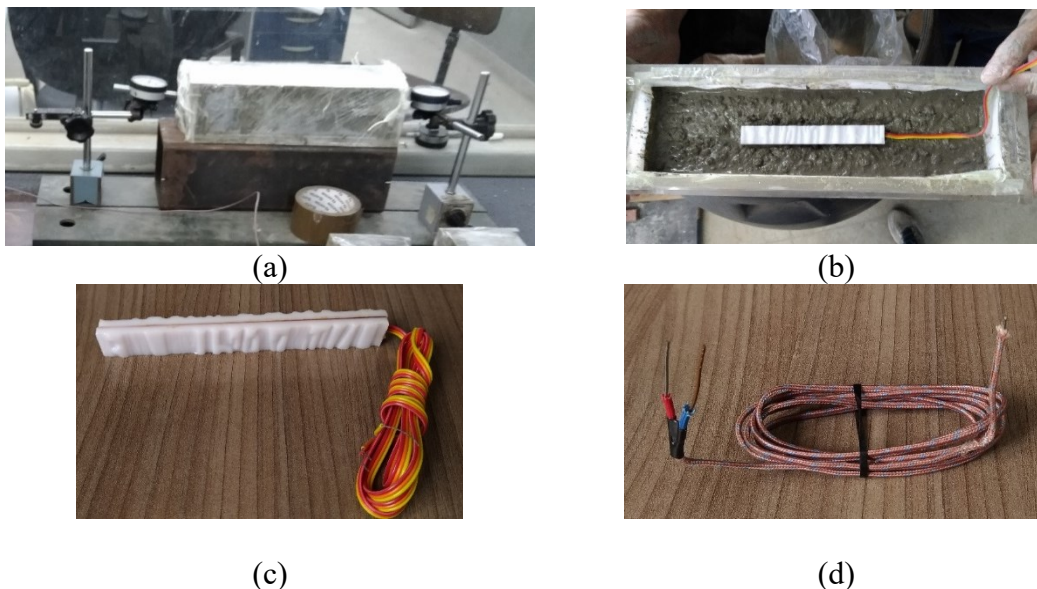
Para determinar a magnitude da retração autógena é preciso determinar e descontar a influência da temperatura proveniente do calor de hidratação do cimento, o qual é crítica nas primeiras idades (BALTHAR, 2004 e FORMAGINI, 2005). Assim, para monitorar a variação da temperatura interna no espécime decorrente do calor de hidratação, foram utilizados termopares de imersão do tipo T, com limite de especial de erro, atuando com um erro máximo na faixa de 0,4% da leitura.

Os pinos de leitura utilizados neste trabalho, são de aço inoxidável e apresentam 22,5mm de comprimento. Diante disto, os pinos de leitura foram previamente fixados na forma,

de modo evitar que durante o processo de vibração do espécime, estes venham a sair da posição ou cair dentro da massa de concreto.

Após a moldagem do corpo de prova, o termopar foi introduzido na metade do comprimento do corpo de prova até atingir a profundidade referente a meia altura do espécime. Após a introdução do termopar no prisma de concreto, o processo de aquisição dos dados foi iniciado através do aquisição dos dados portátil da National Instruments.

Figura 22 – Leitura da retração durante as primeiras 24h de idade, (a) através da utilização de relógios comparadores e (b) através da utilização de strain-gauge de imersão, (c) detalhe do strain-gauge de imersão e (d) Termopar utilizado.



Assim, para se determinar a magnitude da retração autógena, Balthar (2004) indica a utilização da Equação 72 para a determinação da deformação do concreto decorrente da retração autógena. Esta equação é a composição da equação apresentada tanto pela ASTM C157 (2017), quanto pela NM 131 (1997), subtraída da deformação causada pela variação de temperatura.

$$\varepsilon_{RA} = \varepsilon_{medida} - \varepsilon_{\theta} \quad (72)$$

Onde:

ε_{RA}	–	Deformação por retração autógena ($\mu\varepsilon$)
ε_{medida}	–	Deformação medida ($\mu\varepsilon$)
ε_{θ}	–	Deformação por variação térmica ($\mu\varepsilon$)

A deformação medida no espécime pelo relógio comparador é obtida através da Equação 73, já a deformação proveniente da variação térmica do corpo de prova é determinada por meio da Equação 74.

$$\varepsilon_{medida} = \frac{(L_{xi} - L_i)}{G} \times 10^{-6} \quad (73)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \alpha \times \Delta T \quad (74)$$

Onde:

- L_i – Leitura inicial do comprimento do corpo de prova (mm).
- L_{xi} – Leitura do comprimento do corpo de prova na idade de ensaio (mm);
- G – Distância interna entre pinos (mm);
- α – Coeficiente de variação térmica do concreto;
- ΔT – Variação de temperatura lida pelo termopar (°C).

O coeficiente G representa a distância interna entre os pinos de leitura que, de acordo com a ASTM C157 (2017) o valor indicado para esta medida é de 250mm. Todavia, para melhor representar os resultados obtidos experimentalmente, a distância entre pinos foi determinada *in loco*.

Devido a impossibilidade de se realizar o ensaio para determinar o coeficiente de variação térmica, optou-se em adotar o valor convencional de $1,0 \times 10^{-5}$ °C, conforme é indicado pela ABNT NBR 6118 (2014).

Quanto a frequência de leitura, a ABNT NM 131 (1997) não apresenta uma metodologia pré-definida da frequência para se realizar a leitura da retração autógena. Por conta disso, a frequência de leitura do ensaio de retração autógena foi realizada conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Frequência de leitura da retração autógena

Frequência de leitura da retração	
Idade	Frequência
De 6h até 24h de idade	1 leitura a cada 30 min
De 24h até 48h de idade	
De 48h até 7 dias de idade	1 leitura a cada 1 hora
De 7 até 28 dias de idade	1 leitura ao dia
Após 28 dias	1 leitura por semana

3.6. Resumo dos ensaios de retração realizados

Na Tabela 28 é apresentado o resumo da quantidade de ensaios de retração por secagem e de retração autógena que foram realizados ao longo do trabalho.

Tabela 28 – Tabela resumo dos ensaios de retração autógena e por secagem realizado.

Traço	Resumo dos ensaios realizados			
	Retração autógena		Retração por secagem	
	Número de CP produzidos	Número de CP válidos	Número de CP produzidos	Número de CP válidos
C60-ARI	-	-	5	5
C60-CP II	-	-	3	3
C40-M1	3	3	3	3
C40-M2	3	4	3	3
25%RCA	3	2	3	3
50%RCA	3	3	3	3
75%RCA	3	3	3	3
100%RCA	4	4	3	3
25%RMA	4	4	3	3
50%RMA	3	3	3	3
75%RMA	4	4	3	3
100%RMA	4	4	3	3

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO

Face ao apresentado nos capítulos anteriores, nos itens a seguir serão apresentados os resultados experimentais dos ensaios realizados nos corpos de provas confeccionados no laboratório de engenharia civil da UERJ.

4.1. Resultado das propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos

Seguindo a metodologia apresentada no Item 3.3, os concretos produzidos apresentaram as propriedades no estado fresco dispostas na Tabela 29.

Tabela 29: Propriedades dos concretos no estado fresco.

Propriedades dos concretos no estado fresco				
Traço	Data da concretagem	Slump (cm)	Massa específica fresca (Kg/dm ³)	Ar incorporado (%)
C60-ARI	07/11/2018	2,5	-	-
C60-CP II	14/11/2018	3,0	-	-
C40-M1	29/01/2019	1,0	23,80	1,715
C40-M2	08/04/2019	2,5	23,70	1,424
25%RCA	05/02/2019	1,0	23,50	3,198
50%RCA	12/02/2019	19,0	21,90	9,600
75%RCA	12/03/2019	4,0	23,90	0,063
100%RCA	29/03/2019	4,0	23,15	2,485
25%RMA	08/02/2019	1,0	22,85	3,931
50%RMA	14/02/2019	7,0	22,20	4,440
75%RMA	27/03/2019	4,0	22,05	1,719
100%RMA	04/04/2019	4,0	21,55	1,368

É possível observar na Tabela 29 que os concretos produzidos apresentaram um Slump entre a faixa de 1,0 cm e 4,0 cm, com exceção dos concretos 50%RCA e 50%RMA, que apresentaram Slump de 19 cm e 7 cm. É possível observar esses concretos que apresentaram Slump diferente dos demais, também apresentaram valores de ar incorporado elevados, quando comparados com os demais, de 9,60% e 4,44%.

Para os ensaios de resistência à tração e a compressão, é possível verificar na , os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 30 – Propriedades mecânicas dos concretos produzidos no estado endurecido.

Propriedades dos concretos no estado endurecido					
Traço	f_{c7} (MPa)	f_{c14} (MPa)	f_{c28} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E (GPa)
C60-ARI	-	-	50,04	2,97	32,27
C60-CP II	-	-	61,45	3,99	30,36
C40-M1	-	42,32	45,24	3,25	26,39
C40-M2	30,13	32,21	37,11	3,52	32,02
25%RCA	32,09	33,21	38,33	3,42	31,63
50%RCA	29,40	34,32	36,83	3,49	31,77
75%RCA	35,80	38,19	43,52	3,20	30,35
100%RCA	35,01	38,84	44,09	4,14	31,91
25%RMA	27,01	30,51	36,06	3,26	28,99
50%RMA	27,01	28,67	30,94	2,87	27,82
75%RMA	19,46	20,76	23,08	2,55	22,50
100%RMA	14,93	18,17	23,45	2,19	21,02

Ao comparar os concretos de classe de resistência C40, é possível observar que o concreto C40-M1 apresentou uma resistência a compressão 23,89% superior a resistência atingida pela concreto C40-M2 com 14 dias de idade, porém, com o decorrer do tempo essa diferença reduziu para 17,98% da resistência a compressão do concreto C40-M2 na idade de 28 dias. Já para a resistência à tração, o concreto C40-M1 se mostrou 7,67% inferior a resistência do concreto C40-M2 e, para o caso do módulo de elasticidade secante, o concreto C40-M1 apresentou valores 17,58% inferior ao módulo de elasticidade encontrado no concreto C40-M2.

Para os concretos de classe de resistência C40 com substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto, é possível observar na Tabela 31, ao substituir o agregado natural por agregado reciclado resultou, na grande maioria dos casos, em melhora na resistência à compressão em todas as idades avaliadas. Para o caso do concreto com 50% de substituição do NA por RCA, este apresentou aos 7 dias e aos 28 dias uma resistência à compressão inferior a resistência apresentada pelo concreto de referência nas mesmas idades.

Ao avaliar a resistência à tração é possível verificar que os concretos com 25%, 50% e 75% de substituição apresentaram resistência à tração inferior a resistência do concreto de referência, porém, o concreto com 100% de substituição apresentou uma resistência à tração de 17,61% superior à resistência do concreto de referência.

Ao avaliar o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com RCA, é possível observar que a variação do módulo de elasticidade foi ligeiramente inferior ao módulo de

elasticidade apresentado pelo concreto de referência, sendo a diferença máxima registrada de 5,22% para o concreto com 75% de RCA.

Tabela 31 – Tabela comparativa das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com substituição de RCA e o concreto C40-M2.

Relação entre o concreto produzido com RCA e concreto C40-M2					
Traço	f_{c7} (MPa)	f_{c14} (MPa)	f_{c28} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E (GPa)
25%RCA	6,51%	3,10%	3,29%	-2,84%	-1,22%
50%RCA	-2,42%	6,55%	-0,75%	-0,85%	-0,78%
75%RCA	18,82%	18,57%	17,27%	-9,09%	-5,22%
100%RCA	16,20%	20,58%	18,81%	17,61%	-0,34%

Para os concretos produzidos com substituição do NA por RMA, é possível verificar na Tabela 32 que os concretos produzidos com agregado reciclado de tijolo apresentaram, em todas as idades, valores de resistência à compressão inferior a resistência à compressão do concreto de referência. Pode-se observar que para a resistência à tração e o módulo de elasticidade também se mostraram inferiores aos valores apresentados pelo concreto de referência.

Adicionalmente, ainda na Tabela 32, é possível verificar que a resistência à compressão, a resistência a tração e o módulo de elasticidade diminuem na medida em que se aumenta o teor de substituição o do agregado natural pelo agregado reciclado de tijolo.

Tabela 32– Tabela comparativa das propriedades mecânicas dos concretos produzidos com substituição de RMA e o concreto C40-M2.

Relação entre o concreto produzido com RCA e concreto C40-M2					
Traço	f_{c7} (MPa)	f_{c14} (MPa)	f_{c28} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E (GPa)
25%RMA	-10,36%	-5,28%	-2,83%	-7,39%	-9,46%
50%RMA	-10,36%	-10,99%	-16,63%	-18,47%	-13,12%
75%RMA	-35,41%	-35,55%	-37,81%	-27,56%	-29,73%
100%RMA	-50,45%	-43,59%	-36,81%	-37,78%	-34,35%

4.2. Resultados experimentais da retração autógena

Conforme exposto na Tabela 28, foram confeccionados espécimes destinados ao estudo da retração autógena para o concreto C40-M1, C40-M2, 25%RCA, 50%RCA, 75%RCA, 100%RCA, 25%RMA, 50%RMA, 75%RMA e 100%RMA.

O estudo da retração autógena foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consiste em avaliar a magnitude da retração autógena nas primeiras 24 horas de vida do concreto e, a segunda etapa consiste em avaliar a magnitude da retração autógena a partir de 24 horas de idade do concreto.

Para avaliar a efetividade do processo de selagem dos corpos de prova, estes foram pesados logo após serem selados e posteriormente estes foram regularmente pesados. Diante de isto, na tabela abaixo, é possível encontrar a variação percentual de peso dos espécimes aos 28 dias de idade e a variação ocorrida até o dia 17/07/2019.

Illston e Pomeroy (1975) *apud* Balthar (2004), aponta que para se obter uma selagem perfeita dos espécimes nos ensaios, estes não podem apresentar variação superior a 0,5%. Conforme pode ser observado na Tabela 33, as variações de massa sofridas pelos espécimes ensaiados nas idades apresentadas são inferiores ao valor de 0,5%. Tal fato indica que o processo de selagem pode ser considerado aceitável.

Tabela 33 – Variação média da massa dos espécimes selados ao longo do tempo.

Variação média de massa				
Concreto	Com 28 dias de idade		No dia 17/07/2019	
	idade	Variação média	Idade	Variação média
C40-M1	28 dias	- 0,05%	169	- 0,17%
C40-M2		- 0,03%	100	- 0,11%
25%RCA		- 0,05%	162	- 0,15%
50%RCA		- 0,04%	155	- 0,15%
75%RCA		- 0,03%	127	- 0,13%
100%RCA		- 0,04%	110	- 0,11%
25%RMA		- 0,05%	159	- 0,13%
50%RMA		- 0,03%	153	- 0,12%
75%RMA		- 0,03%	112	- 0,11%
100%RMA		- 0,04%	104	- 0,12%

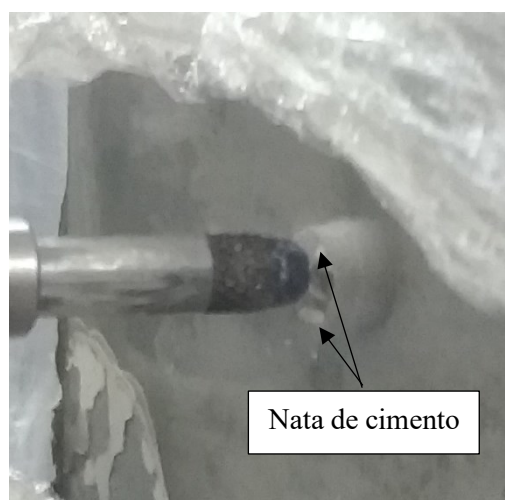
É possível observar na Figura 23 (a) o arranjo de ensaio utilizado para realizar a aquisição da temperatura interna do concreto nas primeiras 24 horas através do dispositivo de

aquisição, a leitura de variação de comprimento dos espécimes. Inicialmente, buscou-se registrar a variação de comprimento dos concretos por meio da utilização de relógios comparadores com resolução de $1\mu\text{m}$, semelhante ao realizado por Formagini (2005). Porém, essa metodologia não se apresentou eficaz pois os pinos de leitura encontravam-se aderidos a forma pela nata de cimento e, conseqüentemente os valores lidos nos relógios permaneceram constantes ao longo das primeiras 24h, conforme pode ser constado na Figura 23 (b).

Figura 23 – (a) Aquisição dos dados na primeira 24 horas de vida, (b) Pino de leitura aderido a forma pela nata de cimento.



(a)



(b)

Diante disto, não foi possível realizar a leitura da variação de comprimento dos concretos C40-M1 e 25%RCA. Devido à dificuldade encontrada em realizar a leitura da variação de comprimento, a solução encontrada foi realizar a leitura da variação de comprimento por meio da utilização de Strain-gauge de imersão.

Conforme explicado no Capítulo 3.5, é necessário subtrair da variação de comprimento registrada pelo Strain-Gauge a variação de comprimento referente a expansão térmica do concreto. Por conta disso, foram lidas as variações de temperatura no concreto nas primeiras 24 horas de idade. Diante disto, as variações de temperatura dos concretos C40-M1 e C40-M2 podem ser encontradas no Gráfico 10 (a) e (b), as variações de temperatura dos concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de substituição do agregado natural por RCA podem ser encontradas no

Gráfico 11 (a), (b), (c) e (d) respectivamente, já as variações de temperatura dos concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de substituição do agregado natural por RMA podem ser encontradas no Gráfico 12 (a), (b), (c) e (d) respectivamente.

Gráfico 10: Variação de temperatura interna no concreto (a) C40-M1 e (b) C40-M2.

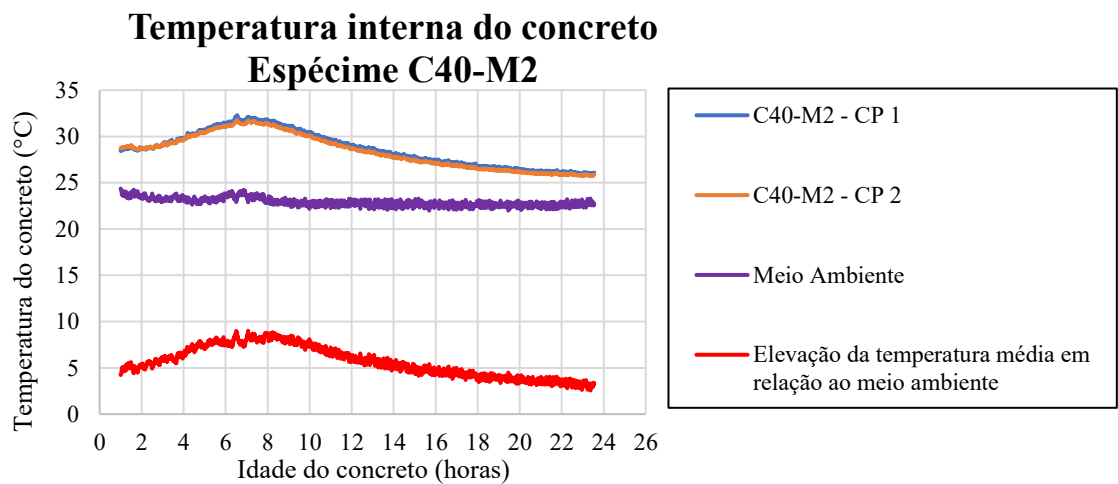
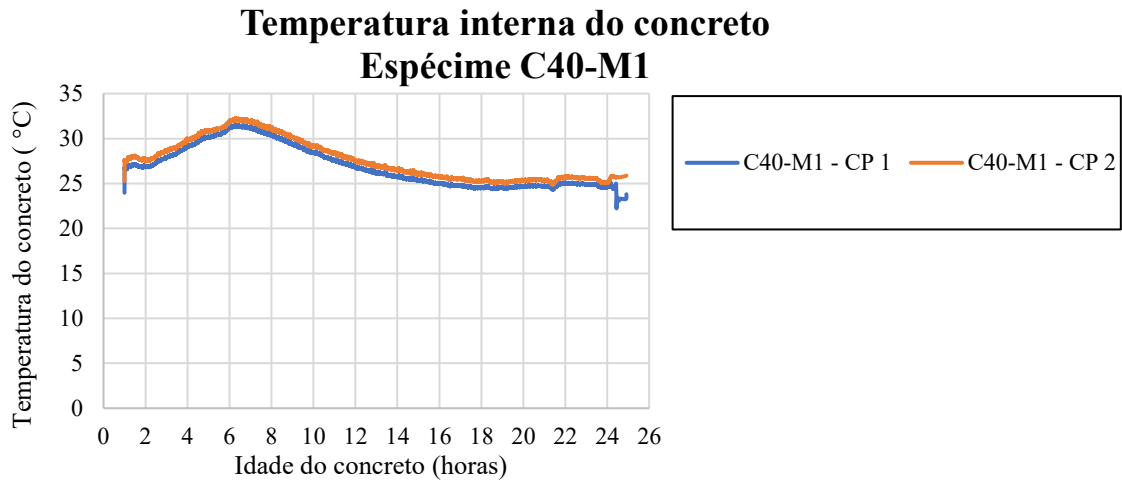
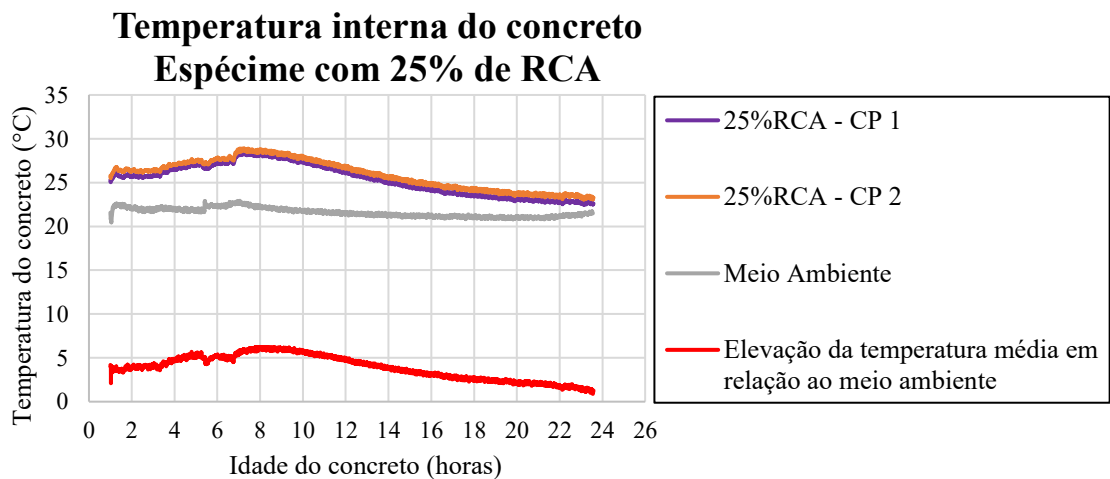
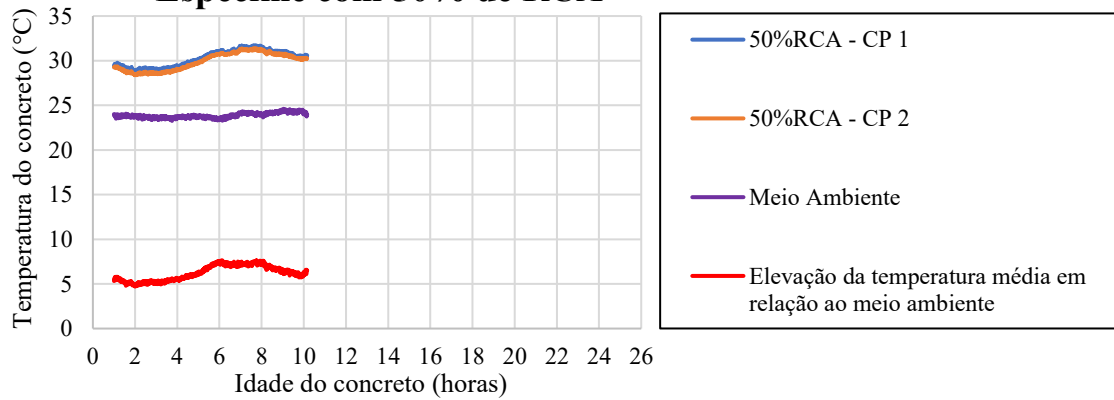


Gráfico 11: Variação de temperatura interna no concreto com (a) 25% de RCA, (b) 50% de RCA, (d) 75% de RCA e (d) 100% de RCA.

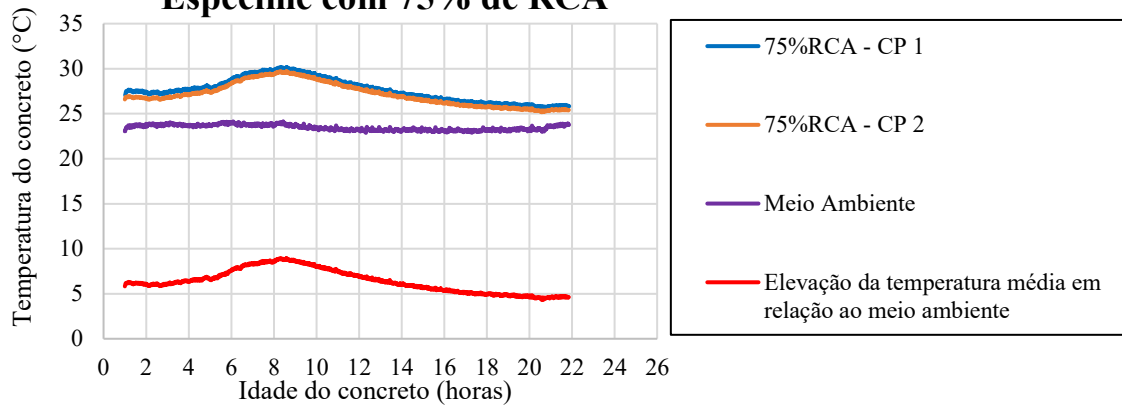


Temperatura interna do concreto Espécime com 50% de RCA



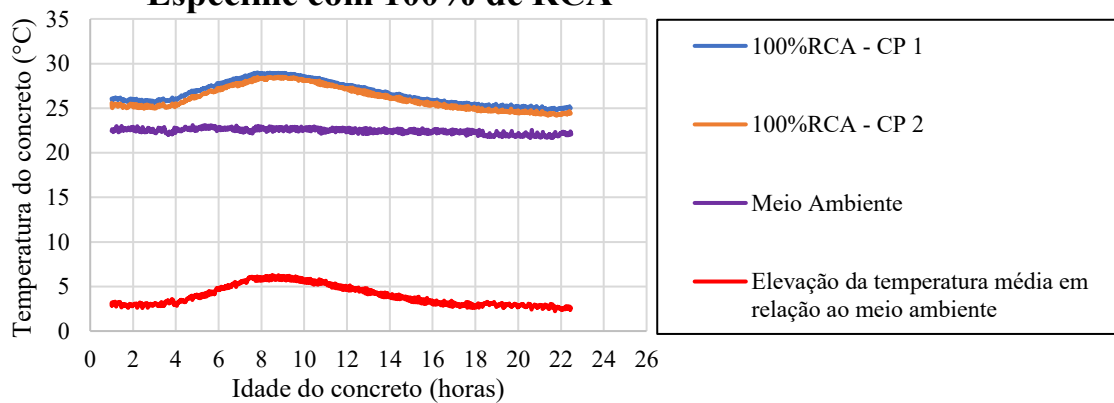
(b)

Temperatura interna do concreto Espécime com 75% de RCA



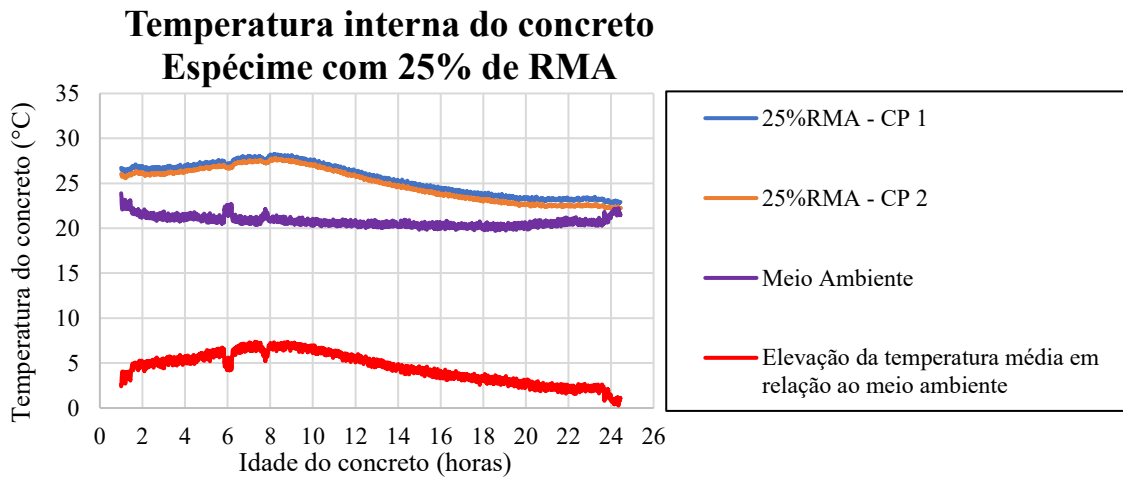
(c)

Temperatura interna do concreto Espécime com 100% de RCA

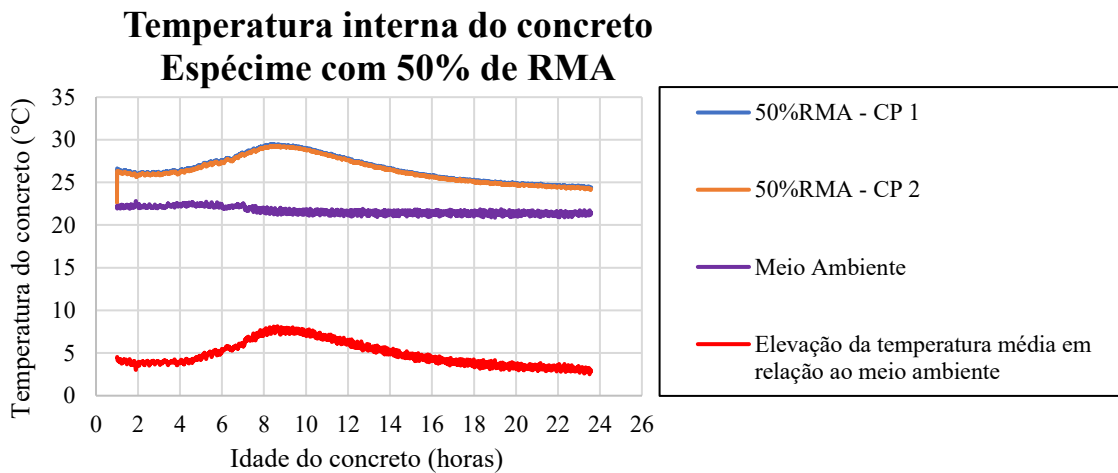


(d)

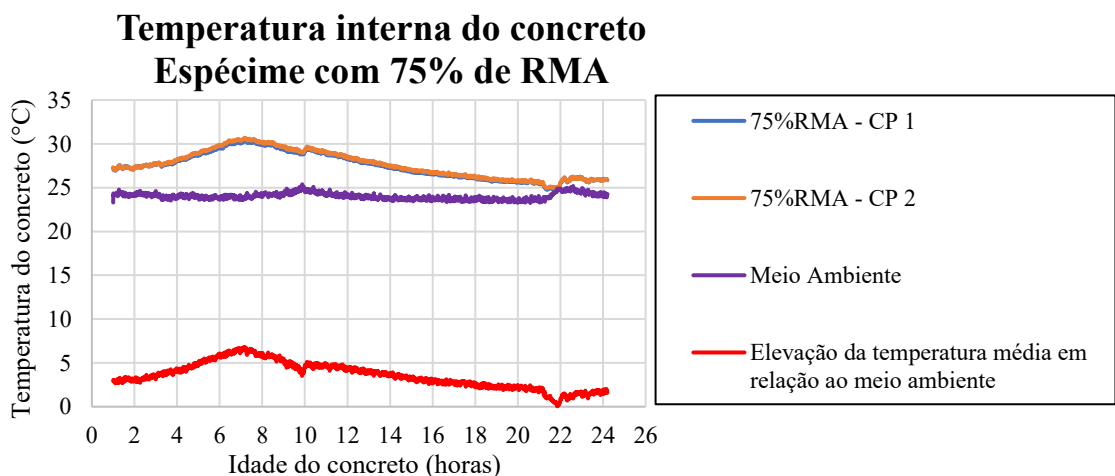
Gráfico 12: Variação de temperatura interna no concreto com (a) 25% de RMA, (b) 50% de RMA, (d) 75% de RMA e (d) 100% de RMA.



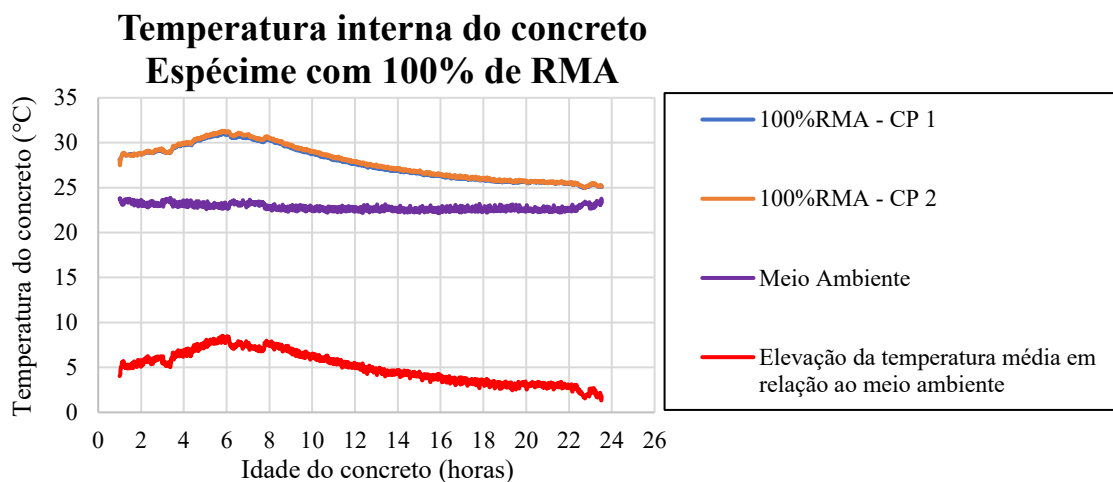
(a)



(b)



(c)



(d)

É possível observar no Gráfico 10 (a) que a temperatura do meio ambiente não foi registrada no concreto C40-M1 e no Gráfico 11 (b), referente ao concreto com 50% de RCA, que houve registro da temperatura interna do concreto até as 10 horas de registros, tal fato se deu devido a interrupção temporária do fornecimento de energia ocorrida na madrugada do dia 12 de fevereiro de 2019.

Assim, de posse das elevações ocorridas nos espécimes é possível calcular a variação de comprimento decorrente da dilatação térmica através da utilização da Equação 74.

A retração autógena ocorrida nos concretos foi determinada através da diferença entre o valor registrado pelo Strain-Gauge e a variação de comprimento decorrente do calor de hidratação, conforme descrito pela Equação 72. Assim, o comportamento da retração autógena nas primeiras 24h de idade do concreto C40-M2 encontra-se representado no , já o comportamento dos concretos com 50%, 75% e 100% de RCA no (a), (b) e (c) e, por fim, o comportamento dos concretos produzidos com 25%, 50%, 75% e 100% de RMA no (a), (b), (c) e (d) respectivamente.

Gráfico 13: Retração autógena compensado nas primeiras 24 horas de idade do concreto C40-M2.

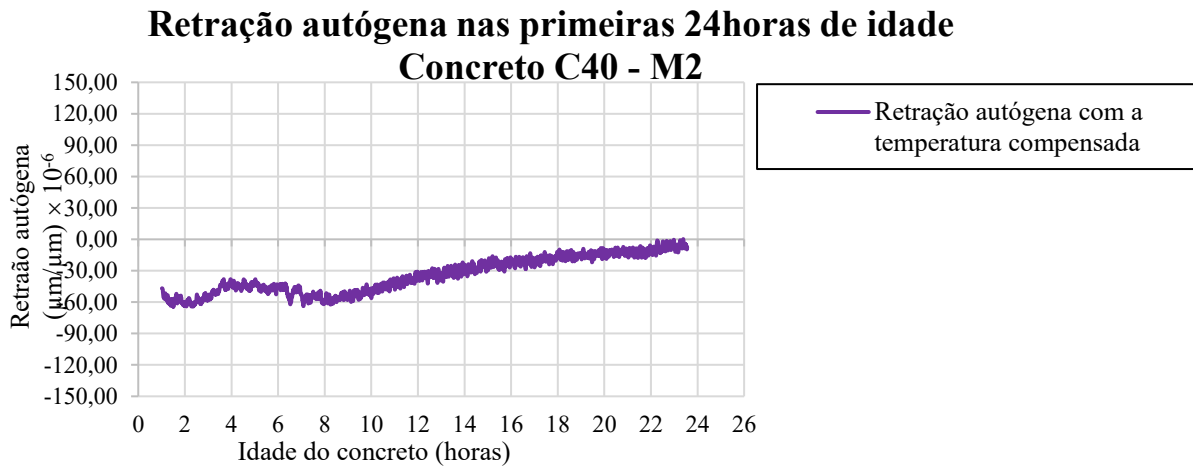
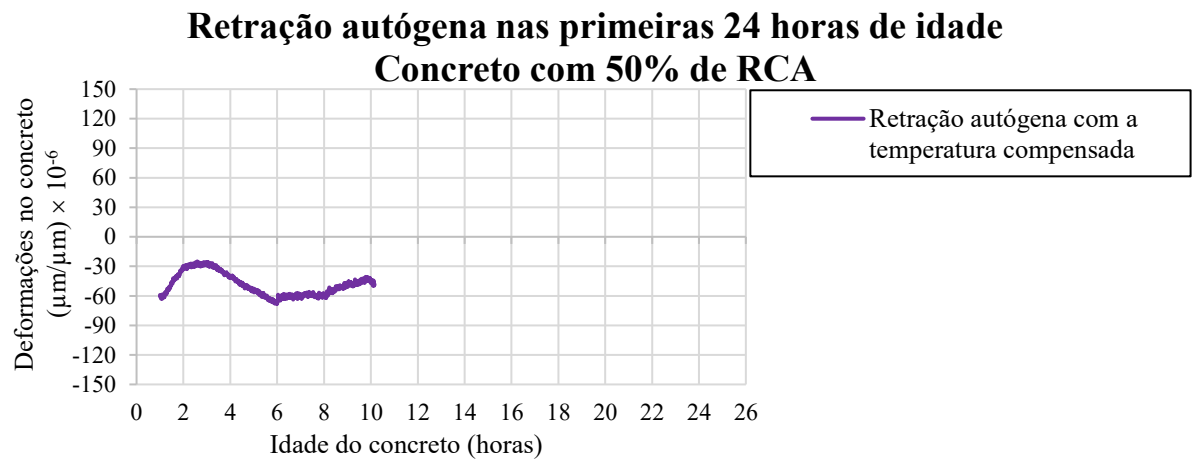
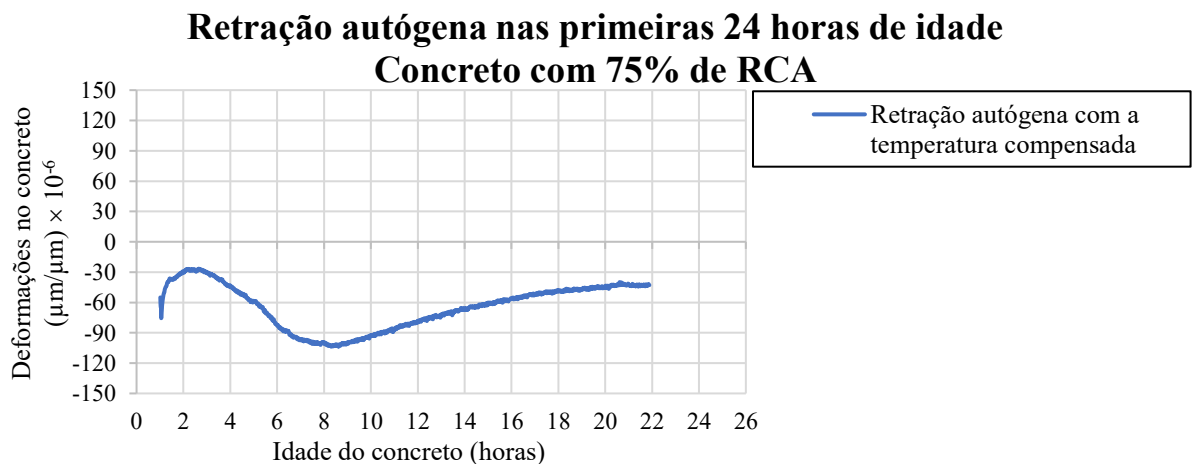


Gráfico 14: Retração autógena compensado nas primeiras 24 horas de idade dos concretos com (a) 50% de RCA, (b) 75% de RCA e (c) 100% de RCA.

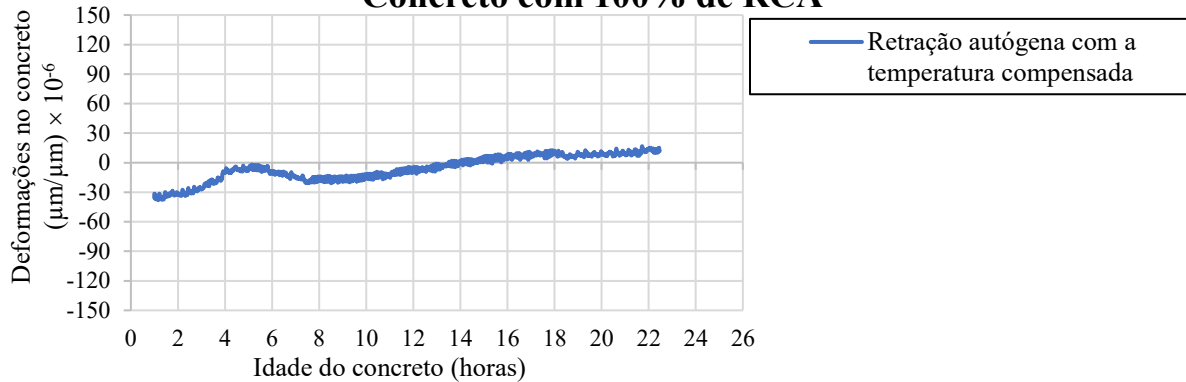


(a)



(b)

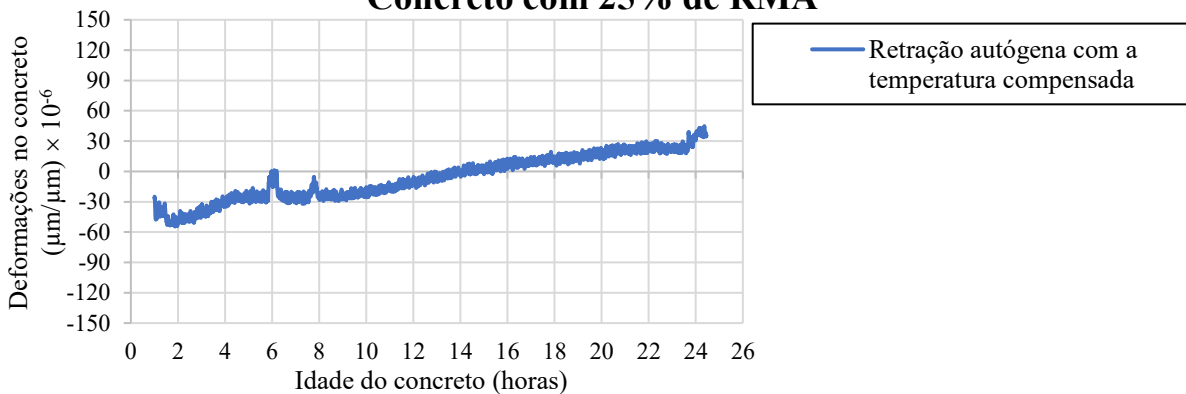
Retração autógena nas primeiras 24 horas de idade Concreto com 100% de RCA



(c)

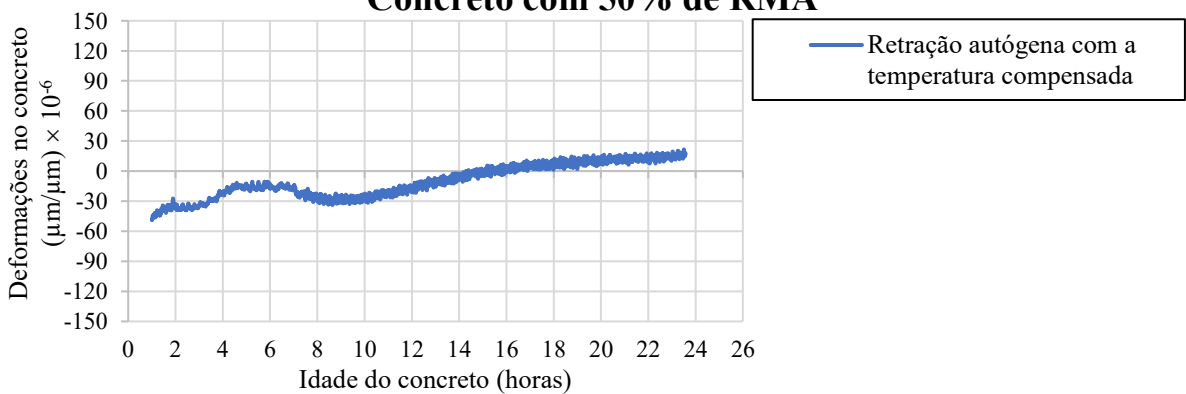
Gráfico 15: Retração autógena compensado nas primeiras 24 horas de idade dos concretos com (a) 25% de RMA, (b) 50% de RMA, (c) 75% de RMA e (c) 100% de RMA.

Retração autógena nas primeiras 24 horas de idade Concreto com 25% de RMA



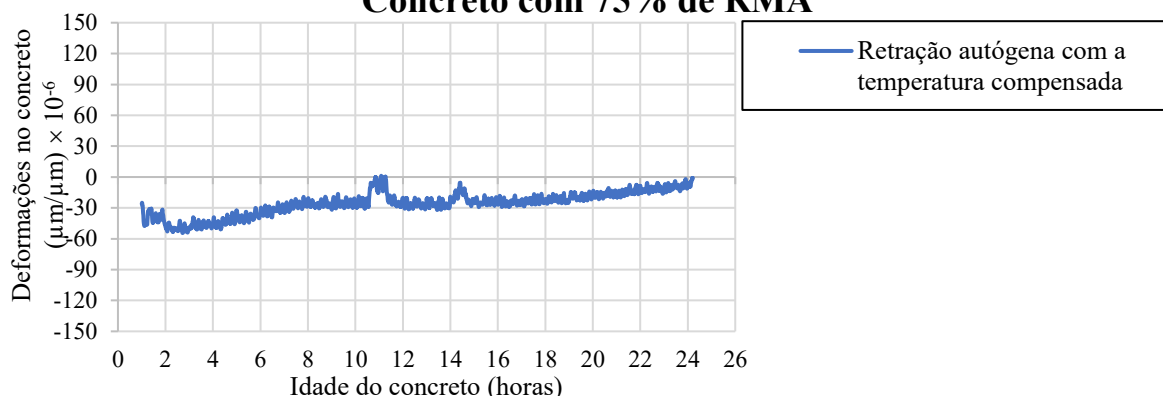
(a)

Retração autógena nas primeiras 24 horas de idade Concreto com 50% de RMA



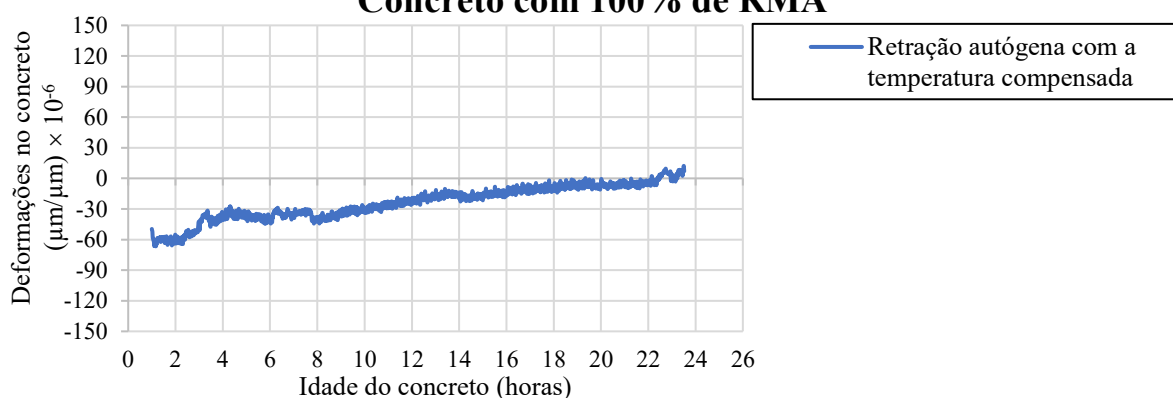
(b)

Retração autógena nas primeiras 24 horas de idade Concreto com 75% de RMA



(c)

Retração autógena nas primeiras 24 horas de idade Concreto com 100% de RMA



(d)

Assim é possível observar na Tabela 34 os valores obtidos nas primeiras 24 horas de vida dos concretos ensaiados.

Tabela 34 – Valores obtidos de retração autógena nas primeiras 24 horas de idade dos concretos ensaiados.

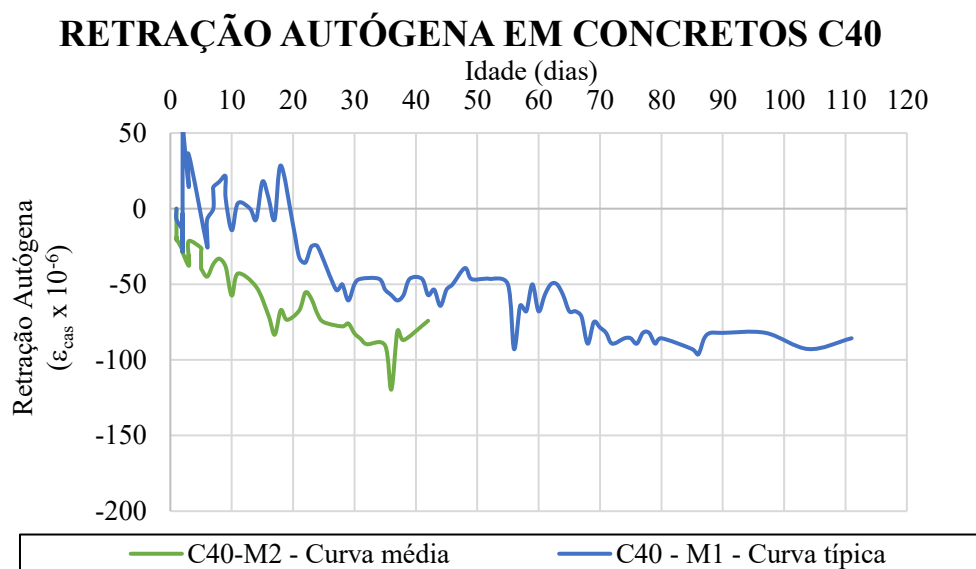
Concreto	Deformação no tempo zero ($\mu\epsilon$)	Deformação com 10 horas e 09 min de idade ($\mu\epsilon$)	Deformação final ($\mu\epsilon$)	Deformação com 10 horas e 09 min de idade ($\mu\epsilon$)	Varição final ($\mu\epsilon$)
C40-M2	-47,85	-46,26	-8,19	1,59	39,67
50%RCA	-60,14	-48,51	-	11,64	-
75%RCA	-64,18	-84,49	-42,38	-20,31	21,08
100%RCA	-33,10	-12,05	13,44	21,05	46,54
25%RMA	-26,41	-22,64	35,29	3,77	61,54
50%RMA	-47,66	-12,81	16,99	34,85	64,65
75%RMA	-31,05	7,05	34,78	38,10	65,84
100%RMA	-51,79	-31,38	10,08	20,41	61,88

É possível observar na tabela que os concretos produzidos com RMA apresentaram homogeneidade nos valores finais da retração e estes foram superiores ao valor encontrado no concreto de referência. Já para os concretos produzidos com agregado reciclado de concreto, não foi possível observar homogeneidade dos valores finais da retração autógena, mas a média destes concretos apresentou valor semelhantes ao encontrado no concreto de referência.

É possível encontrar no Gráfico 16 a evolução da retração autógena dos espécimes avaliados até a leitura realizada na idade referente ao dia 20/05/2019. Consoante ao realizado para a retração nas primeiras 24 horas de idade, a variação de comprimento decorrente da temperatura registrada no laboratório foi subtraída do valor registrado experimentalmente.

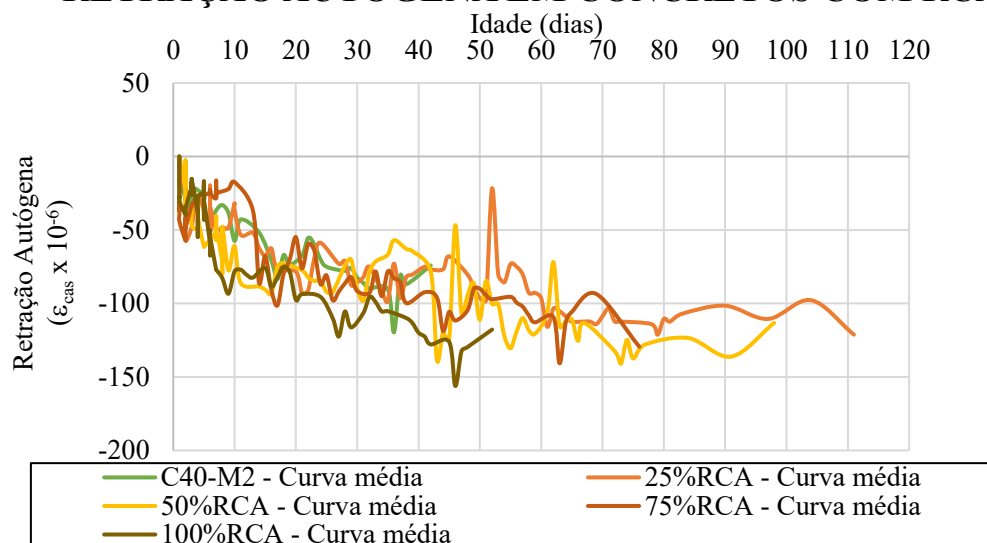
Para os concretos C40-M2, 25% RCA, 50% RCA, 75% RCA, 100%RCA, 25% RMA, 50% RMA, 75% RMA e 100%RMA foi adotada a curva média para os valores de retração autógena, pois está melhor representou o comportamento da retração autógena desses concretos ao longo do tempo. Para o concreto C40-M1, foi utilizada a curva típica pois, para este caso, esta curva foi a que melhor representou o comportamento da retração autógena desse concreto.

Gráfico 16: Retração autógena obtida (a) nos concretos C40-M1 e C40-M2, (b) nos concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de RCA e (d) nos concretos com 25%, 50%, 75% e 100% de RMA.



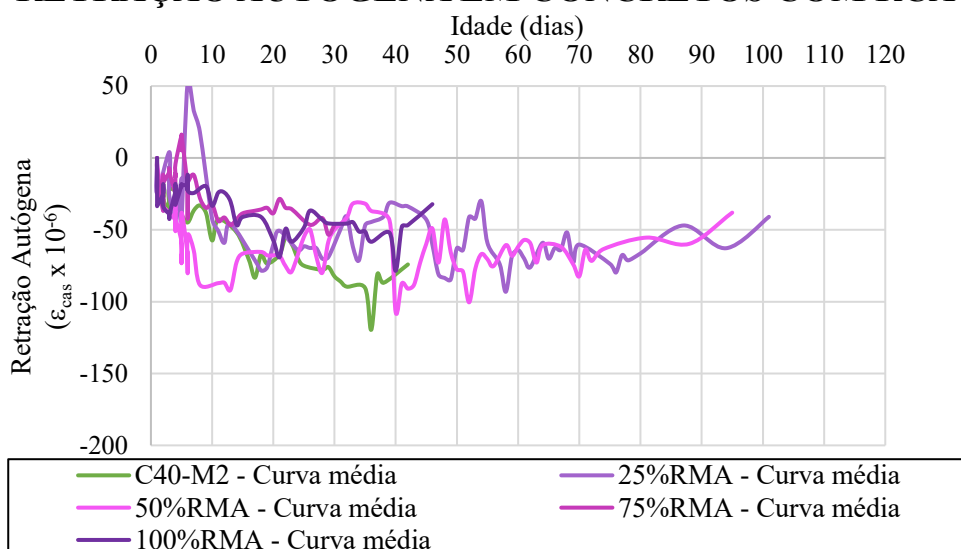
(a)

RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETOS COM RCA



(b)

RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETOS COM RCA



(c)

Diante do exposto no Gráfico 16, é possível observar que a variação do fator água cimento fez com que a retração autóloga apresentada pelo concreto C40-M1, de a/c de 0,35, apresentasse magnitude inferior a retração autóloga apresentada pelo concreto C40-M2, de a/c de 0,38.

Ao substituir o agregado graúdo natural por agregado reciclado de concreto, é possível observar que, na medida em que se aumenta o teor de substituição do agregado natural, a magnitude da retração autóloga também se eleva.

Fathifazl *et al.* (2011), ao estudar uma nova metodologia de produzir concretos com RCA, apontou que o aumento da retração encontrada nestes concretos pode ser decorrente da

camada de argamassa aderida no agregado reciclado e essa camada diminui a quantidade de agregado graúdo e aumenta a quantidade de argamassa no traço.

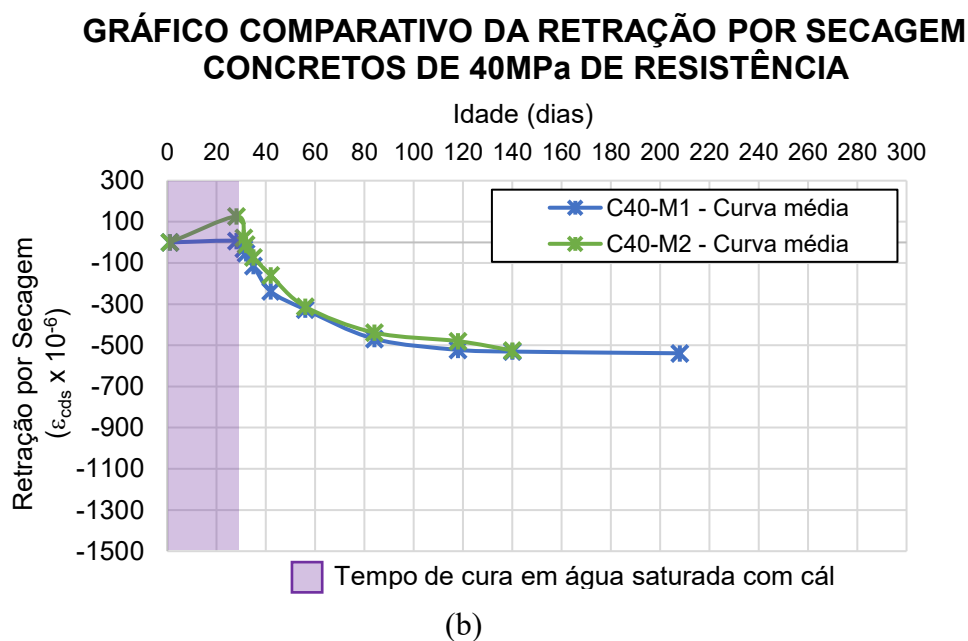
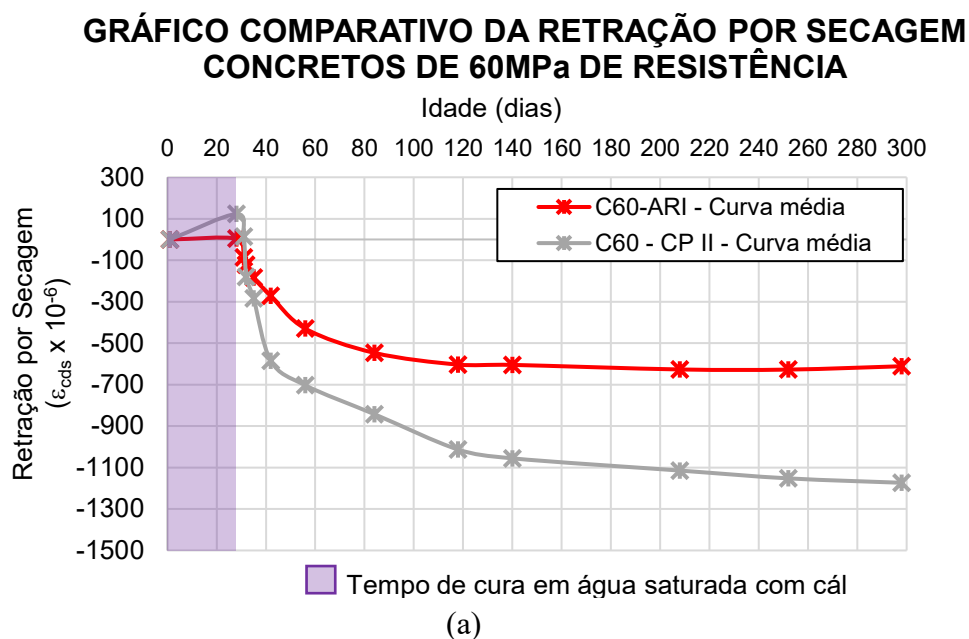
Já para o caso do agregado de tijolo, é possível observar que a substituição o NA pelo RMA resultou em redução da retração autógena. De acordo com Silva *et al.* (2015) tal fato pode ser explicado devido a elevada absorção apresentada por este material e, a água presente no interior do agregado resultou na melhora na cura interna do concreto, prevenindo a variação volumétrica decorrente da auto dessecação.

4.3. Resultados experimentais da retração por secagem

Para avaliar a retração por secagem dos concretos produzidos, os espécimes confeccionados foram submetidos a metodologia de ensaio apresentada no Item **Erro! Fonte d e referência não encontrada.** Nos dias indicados pelas normas para realizar a aferição da variação de comprimento dos espécimes também foi registrada a temperatura do laboratório, umidade relativa e o peso dos espécimes.

No ANEXO A, é possível encontrar para cada concreto produzido os registros das temperaturas e umidades relativas registradas em cada uma das leituras. Diante destes registros, foi possível constatar que o laboratório apresentou temperatura média de 21,49°C ($\pm 0,65^\circ\text{C}$) e umidade relativa média de 59,09% ($\pm 3,35\%$). É possível observar no Gráfico 17 (a) a comparação da retração por secagem dos concretos de classe de resistência de 60MPa, tendo variado o tipo de cimento utilizado no traço e, no Gráfico 17 (b) o comparativo da curva medida da retração por secagem dos concretos de resistência de 40MPa.

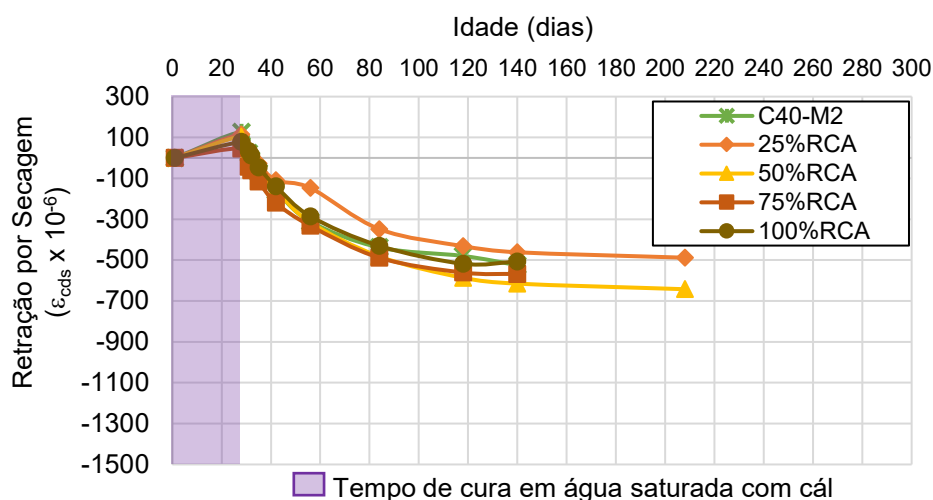
Gráfico 17: Resultados experimentais da retração por secagem dos (a) concretos de classe de resistência de 60MPa e (b) concretos de classe de resistência de 40MPa.



No Gráfico 18 (a) é possível observar os valores obtidos experimentalmente da curva média da retração por secagem nos concretos produzidos com agregado reciclado de concreto comparados com a curva média da retração por secagem do concreto de referência (C40-M2). Similar ao realizado com os concretos produzidos com RCA, no Gráfico 18 (b) pode-se encontrar os valores obtidos experimentalmente da curva média dos concretos produzidos com RMA comparados com a curva média do concreto de referência.

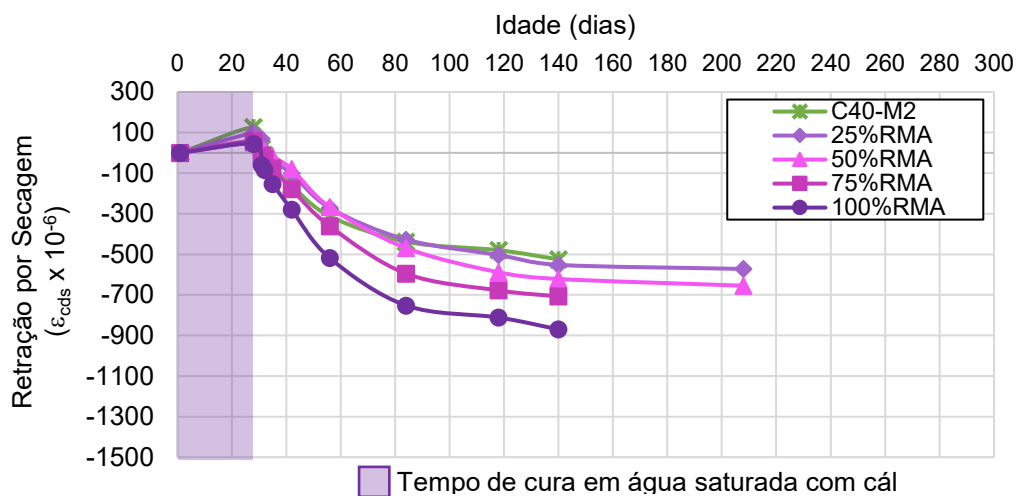
Gráfico 18: Resultados experimentais da retração por secagem, (a) dos concretos com RCA e (b) dos concretos com RMA.

GRÁFICO COMPARATIVO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM CONCRETOS COM RCA



(a)

GRÁFICO COMPARATIVO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM CONCRETOS COM RMA



(b)

Para o concreto C60-ARI, o espécime CP1 foi retirado da análise pois este apresentou valores de retração por secagem na ordem de 69,1% a mais que a média obtida com os demais corpos de prova.

Para o concreto 25%RCA, o corpo de prova CP2 foi retirado da composição da média pois a retração apresentada por este espécime apresentou valores 199,5% a mais que a obtida com os demais corpos de prova.

É possível observar no Gráfico 17 (a) e (b) que os concretos C60-ARI, C40-M1 e C40-M2 apresentaram valores de retração por secagem com magnitudes semelhantes mas, o concreto C60-CP II apresentou um comportamento diferenciado dos demais.

No Gráfico 18 (a) encontram-se apresentados os valores médios da magnitude da retração encontrada nos concretos produzidos com substituição do NA por RCA. Adicionalmente ao gráfico, é possível observar na Tabela 35 a influência da substituição do agregado natural por reciclado de concreto.

Tabela 35 – Relação percentual da magnitude da retração dos concretos com RCA e o concreto de referência.

Relação percentual entre os concretos produzidos com RCA e o concreto C40-M2				
Idade	Concreto 25%RCA	Concreto 50%RCA	Concreto 75%RCA	Concreto 100%RCA
Leitura ao desformar	-	-	-	-
Ao retirar da água c/ cal	-8,8%	-17,2%	-64,3%	-37,9%
3 dias de secagem	79,5%	15,0%	-293,6%	46,4%
4 dias de secagem	-133,2%	-133,5%	472,0%	-212,1%
7 Dias de secagem	-60,9%	-14,8%	60,7%	-36,1%
14 dias de secagem	-31,5%	-1,6%	36,9%	-13,5%
28 Dias de secagem	-52,9%	1,0%	6,3%	-8,5%
56 Dias de secagem (8 semanas)	-20,5%	10,1%	11,5%	-1,8%
3 meses de secagem	-10,0%	22,3%	16,9%	7,9%
16 semanas de secagem	-12,0%	17,2%	8,2%	-3,4%
Média	11,03%	19,74%	12,57%	2,29%

No Gráfico 18 (b) encontram-se apresentados os valores médios da magnitude da retração encontrada nos concretos produzidos com substituição do NA por RMA e, complementarmente, é possível verificar na Tabela 36 a influência da substituição do agregado natural por reciclado de tijolo.

Tabela 36 – Relação percentual da magnitude da retração dos concretos com RMA e o concreto de referência.

Relação percentual entre os concretos produzidos com RMA e o concreto C40-M2				
Idade	Concreto 25%RMA	Concreto 50%RMA	Concreto 75%RMA	Concreto 100%RMA
Leitura ao desformar	-	-	-	-
Ao retirar da água c/ cál	-21,8%	-59,6%	-53,9%	-65,2%
3 dias de secagem	203,8%	-11,3%	-157,6%	-366,9%
4 dias de secagem	-201,3%	-189,4%	180,2%	696,4%
7 Dias de secagem	-42,6%	-72,1%	4,9%	111,6%
14 dias de secagem	-36,3%	-50,5%	11,7%	74,8%
28 Dias de secagem	-12,9%	-14,3%	15,8%	66,1%
56 Dias de secagem (8 semanas)	-2,5%	7,0%	35,8%	71,7%
3 meses de secagem	4,9%	22,7%	41,3%	69,2%
16 semanas de secagem	5,2%	18,5%	34,8%	65,7%
Média	5,05%	20,58%	38,08%	67,44%

Na Tabela 36 é possível observar que, para as últimas duas leituras, ao substituir o agregado natural por RCA na proporção de 25% resultou em retração na ordem 11,03% inferior em relação ao concreto de referência, já o concreto com 50% de RCA apresentou valores 19,74% superior ao concreto de referência, o concreto com 75% de substituição do NA pelo RCA apresentou valores de retração de 12,57% superior ao concreto de referência e o concreto com 100% de RCA apresentou valores 2,29% superiores ao concreto de referência.

É possível observar nesta tabela que o concreto com 25% de agregado reciclado apresentou valores de retração 5,05% maiores que o concreto de referência, o concreto com 50% de RMA apresentou valores 20,58% superiores ao apresentado pelo concreto de referência, o concreto com 75% de RMA apresentou valores 38,08% superiores ao concreto de referência e o concreto com 100% de RMA apresentou valores 67,44% maiores que os encontrados no concreto de referência.

Na Tabela 37, é possível encontrar a comparação entre os concretos com a mesmo teor de substituição de agregado natural por RCA e RMA.

Tabela 37: Relação percentual da magnitude da retração dos concretos com RMA e o concreto produzido com RCA.

Relação percentual entre os concretos produzidos com RMA e o concreto produzido com RCA				
Idade	Concreto 25%RMA	Concreto 50%RMA	Concreto 75%RMA	Concreto 100%RMA
Leitura ao desformar	-	-	-	-
Ao retirar da água c/ cál	-14,2%	-51,2%	29,0%	-43,9%
3 dias de secagem	69,3%	-22,8%	-70,2%	-282,4%
4 dias de secagem	204,7%	166,4%	-51,0%	-810,6%
7 Dias de secagem	46,7%	-67,3%	-34,7%	231,3%
14 dias de secagem	-7,0%	-49,7%	-18,4%	102,0%
28 Dias de secagem	85,0%	-15,1%	8,9%	81,6%
56 Dias de secagem (8 semanas)	22,6%	-2,8%	21,8%	74,9%
3 meses de secagem	16,6%	0,3%	20,9%	56,7%
16 semanas de secagem	19,6%	1,1%	24,6%	71,5%
3 meses	17,2%	1,9%		
Média	17,80%	1,12%	22,73%	64,11%

É possível verificar na Tabela 37 que o concreto produzido com 25% de agregado reciclado de tijolo apresentou retração 17,80% superior a encontrada no concreto produzido com 25% de agregado reciclado de concreto. Para o teor de 50% de substituição, é possível observar que concreto produzido com RMA apresentou retração 1,12% maior que o concreto produzido com RCA. Ao avaliar o teor de 75% de substituição, é possível observar que o concreto produzido com RMA apresentou retração 22,73% superior ao concreto com RCA. Por fim, ao avaliar o teor de 100% de substituição, é possível observar que o concreto produzido com RMA apresentou retração com magnitude 64,11% superior a retração encontrada no concreto com RCA.

5. Análise dos resultados

5.1. Avaliação dos resultados de retração com as normas adotadas

Diante dos valores médios de retração apresentados nos itens 4.1 e 4.3, neste item, estes valores serão comparados com os valores indicados para estes concretos pela norma ABNT NBR 6118 (2014), CEB-*fip* (2010), Eurocode 2 (2004) e o ACI 209.2R (2008). A Tabela 38 apresenta as propriedades gerais dos concretos utilizadas como parâmetros no cálculo da retração autógena e da retração por secagem pelos códigos citados.

Tabela 38 – Propriedades gerais utilizadas para a determinação da retração autógena e por secagem através dos códigos normativos avaliados.

Propriedades pertinentes aos concretos produzidos utilizadas na determinação da magnitude da retração pelos códigos normativos						
Concreto	Temp. média (°C)	Umidade relativa média (%)	$f_{ck\ 28}$ (MPa)	Slump (mm)	Ar incorporado (%)	Tempo de cura (dias)
C60-ARI	21,73	58,09	50,04	25	-	28 dias
C60-CP II	21,45	60,55	61,45	30	-	
C40-M1	21,77	57,55	45,24	10	1,71	
C40-M2	21,67	60,56	37,11	25	1,42	
25%RCA	21,50	58,18	38,33	10	3,20	
50%RCA	21,36	58,18	36,83	190	9,60	
75%RCA	21,44	59,78	43,52	40	0,06	
100%RCA	21,78	60,44	44,09	40	2,49	
25%RCA	21,45	58,55	36,06	10	3,93	
50%RCA	21,30	56,70	30,94	70	4,44	
75%RCA	21,50	59,50	23,08	40	1,72	
100%RCA	21,35	61,00	23,45	40	1,37	

Adicionalmente a Tabela 38, é possível encontrar na Tabela 39 os parâmetros normativos específicos de cada uma das normas utilizadas no cálculo da retração autógena e por secagem pelos códigos.

Tabela 39: Propriedades específicas de cada norma utilizadas no cálculo da retração autógena e da retração por secagem.

Propriedades utilizadas no cálculo da retração							
Concreto	CEB- <i>fip</i>			EC 2		ACI	
	α_{as}	α_{ds1}	a_{ds2}	α_{ds1}	a_{ds2}	Ψ (%)	C (kg/m ³)
C60-ARI	700	4	0,012	6	0,011	-	-
C60-CP II	800	3	0,013	4	0,012	-	-
C40-M1	800	3	0,013	4	0,012	48,57	490,67
C40-M2	800	3	0,013	4	0,012	50,27	469,99
25%RCA	800	3	0,013	4	0,012	51,59	470,58
50%RCA	800	3	0,013	4	0,012	52,25	442,81
75%RCA	800	3	0,013	4	0,012	52,45	488,08
100%RCA	800	3	0,013	4	0,012	53,16	479,60
25%RCA	800	3	0,013	4	0,012	54,28	468,78
50%RCA	800	3	0,013	4	0,012	58,09	471,62
75%RCA	800	3	0,013	4	0,012	62,07	485,84
100%RCA	800	3	0,013	4	0,012	67,19	493,07

Diante dos dados apresentados na Tabela 38 e Tabela 39, foram elaborados os gráficos a seguir. Nestes gráficos foram comparados a retração autógena obtida experimentalmente e a retração autógena obtida através dos códigos CEB-*fip* (2010) e Eurocode 2 (2004). Diante disso, o Gráfico 19 (a) e (b) apresentam a avaliação realizada para os concretos C40-M1 e C40-M2, respectivamente. Semelhante a avaliação realizada para os concretos de 40MPa de resistência, o Gráfico 20 (a), (b), (c) e (d) apresentam a avaliação realizada para os concretos produzidos com substituição do NA pelo RCA nos teores de 25%, 50%, 75% e 100% respectivamente e, por fim, no Gráfico 21 (a), (b), (c) e (d) apresentam a avaliação realizada para os concretos produzidos com substituição do NA pelo RMA nos teores de 25%, 50%, 75% e 100% respectivamente.

Gráfico 19: Gráfico comparativo da retração autógena dos concretos (a) C40-M1 e (b) C40-M2, com os códigos utilizados.

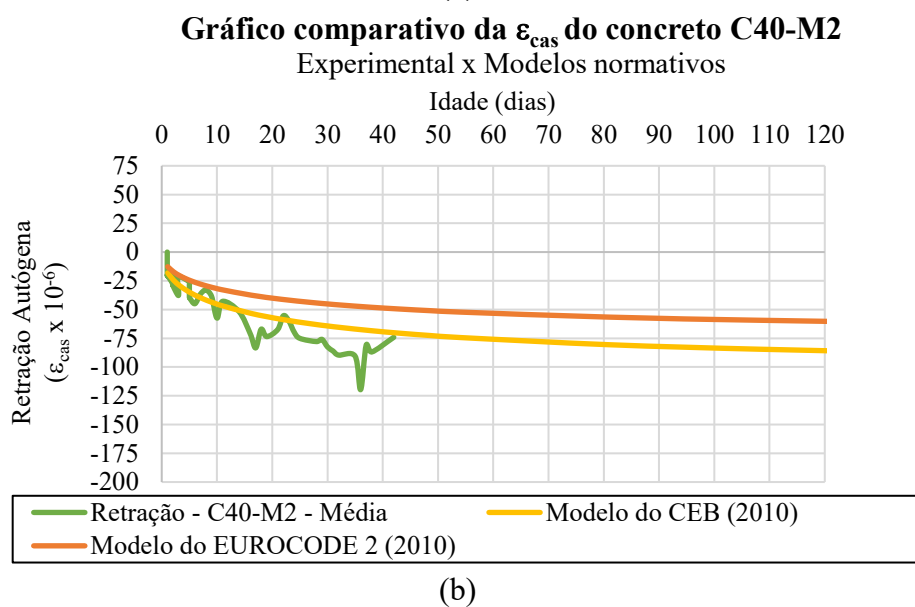
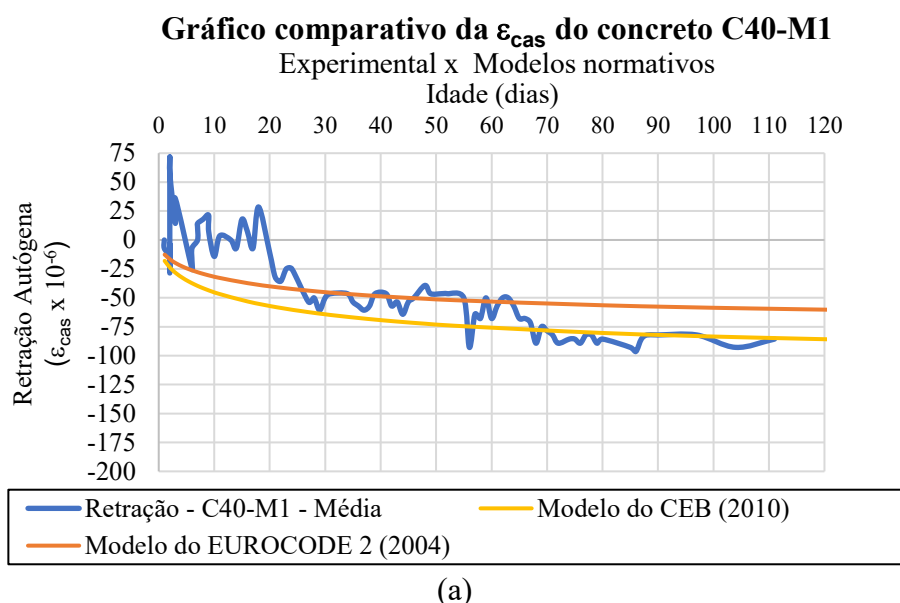
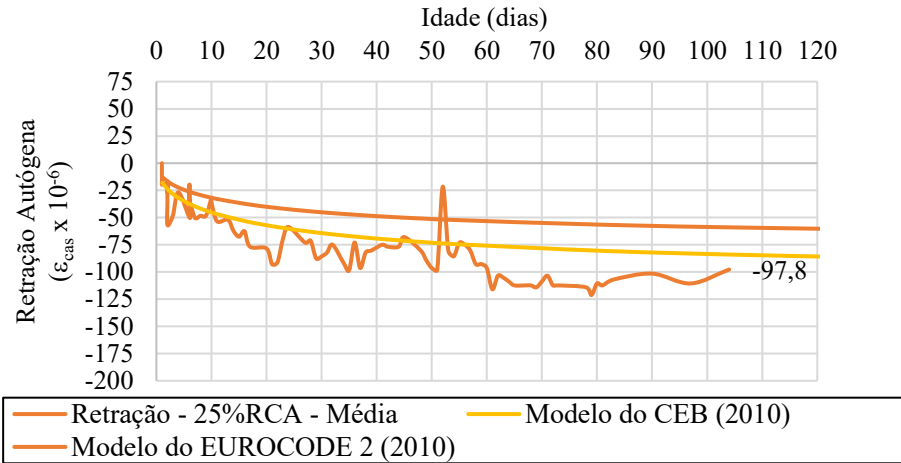


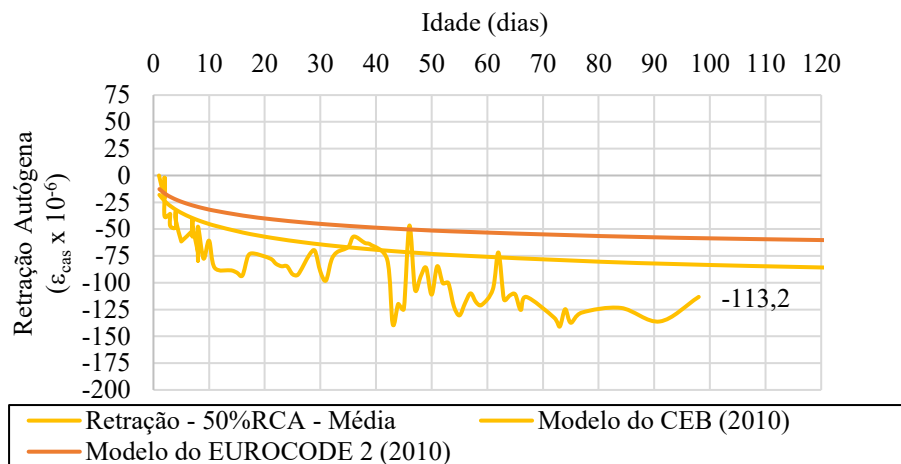
Gráfico 20: Gráfico comparativo da retração autógena dos concretos (a) 25% de RCA, (b) 50% de RCA, (c) 75% de RCA e (d) 100% de RCA , com os códigos utilizados.

Gráfico comparativo da ϵ_{cas} do concreto 25%RCA



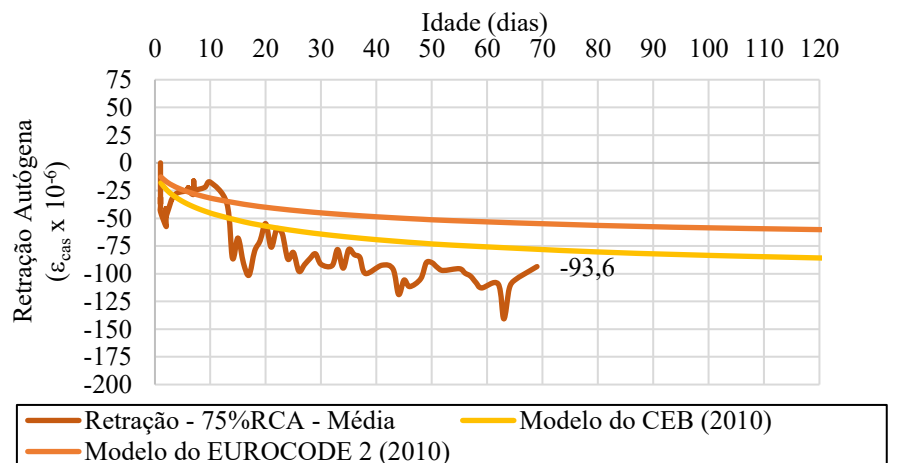
(a)

Gráfico comparativo de ϵ_{cas} do concreto 50%RCA



(b)

Gráfico comparativa da ϵ_{cas} do concreto 75%RCA



(c)

Gráfico comparativo da ϵ_{cas} do concreto 100%RCA

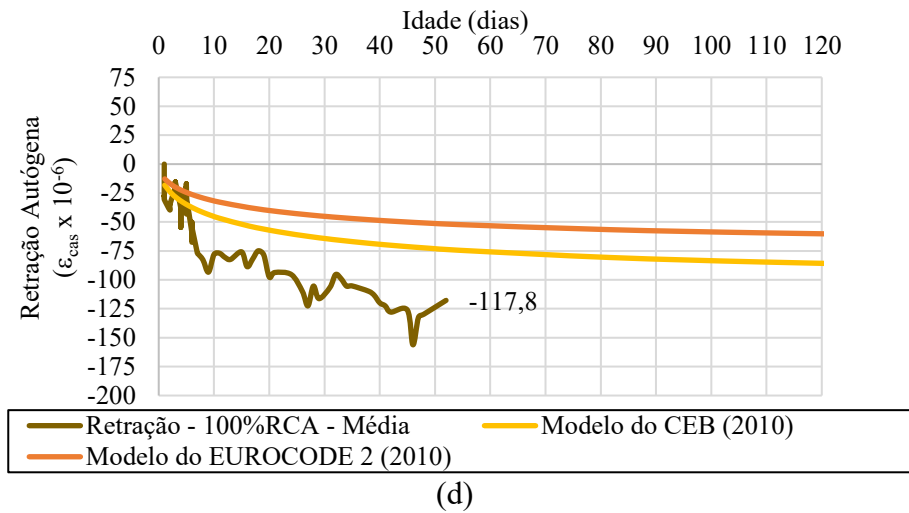


Gráfico 21: Gráfico comparativo da retração autóloga dos concretos (a) 25% de RMA, (b) 50% de RMA, (c) 75% de RMA e (d) 100% de RMA , com os códigos utilizados.

Gráfico comparativo da ϵ_{cas} do concreto 25%RMA

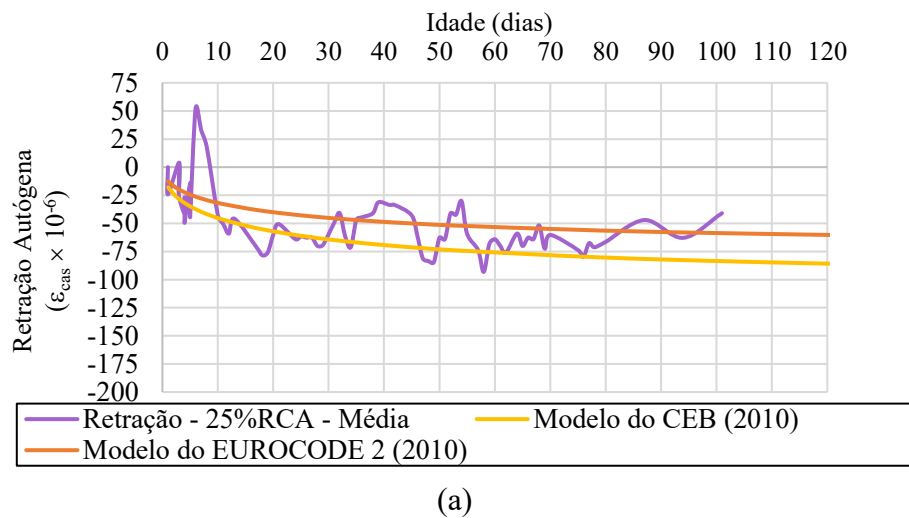


Gráfico comparativo da ϵ_{cas} do concreto 50%RMA

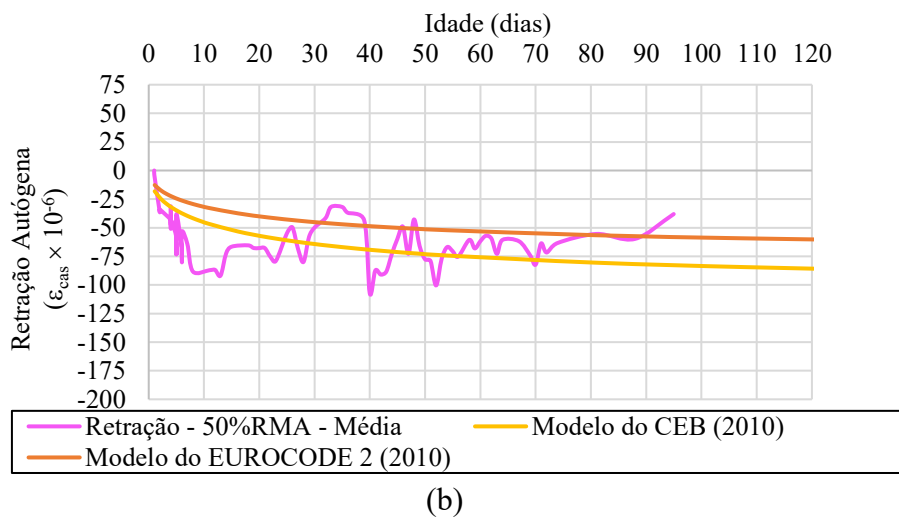
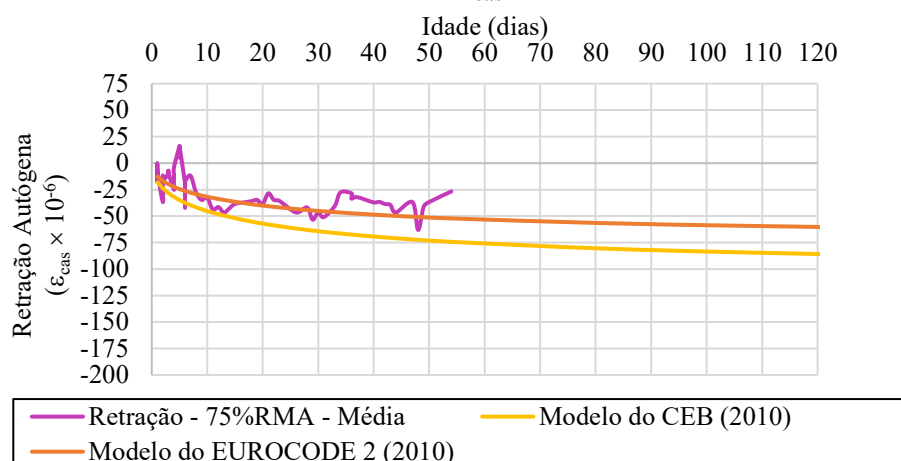
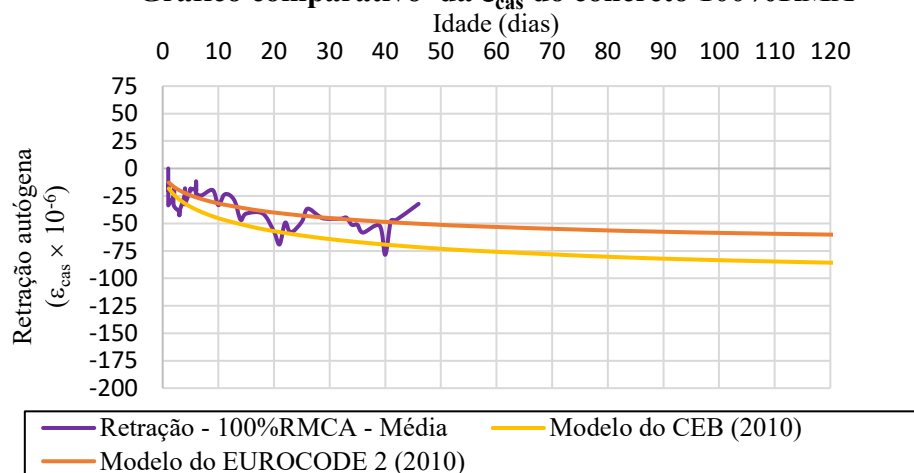


Gráfico comparativo da ϵ_{cas} do concreto 75%RMA



(c)

Gráfico comparativo da ϵ_{cas} do concreto 100%RMA



(d)

É possível observar no Gráfico 19 (a) que inicialmente o concreto C40-M1 apresentou oscilação na leitura da retração autóloga mas, após o 20 dia, o comportamento deste concreto se assemelhou ao comportamento indicado pelo Eurocode 2 (2004). É possível verificar na Tabela 40 que aos 28 dias este concreto apresentou o valor da retração autóloga 9,8% superior ao valor indicado pelo Eurocode 2 (2004), já ao comparar com o CEB-*fip* (2010), este concreto apresentou valor de retração autóloga 28,5% inferior ao valor indicado pelo código. Ao avaliar este concreto com 42 dias, é possível observar que o obtido experimentalmente se assemelha mais ao valor indicado pelo Eurocode 2 (2004) do que o valor indicado pelo CEB-*fip* (2010).

Adicionalmente a isto, é possível verificar no Gráfico 19 (a), que em idades superiores a 60 dias, o concreto C40-M1 passa a apresentar valores mais próximos dos valores indicados pelo CEB-*fip* (2010).

Para o concreto C40-M2, é possível observar no Gráfico 19 (b) e na Tabela 40 que o comportamento da retração autógena deste concreto foi mais próximo do indicado pelo CEB-fip (2010) do que o comportamento indicado pelo Eurocode 2 (2004).

Tabela 40 – Variação percentual entre os valores obtidos experimentalmente e os valores indicados pelo CEB-fip (2010) e o Eurocode 2 (2004).

Traço	Relações entre o experimental e os códigos internacionais					
	Relação com o CEB- <i>fip</i> 2010			Relação com o Eurocode 2 (2004)		
	7 dias	28 dias	42 dias	7 dias	28 dias	42 dias
C40-M1	479,9%	-28,5%	-53,6%	366,8%	9,8%	-7,8%
C40-M2	-11,5%	17,3%	3,6%	21,7%	41,9%	32,3%
25%RCA	18,4%	9,4%	6,9%	42,7%	36,4%	34,6%
50%RCA	3,0%	13,4%	8,8%	31,9%	39,2%	36,0%
75%RCA	-56,1%	39,8%	22,8%	-9,6%	57,7%	45,8%
100%RCA	46,9%	38,8%	44,0%	62,7%	57,0%	60,7%
25%RMA	223,0%	7,4%	-110,2%	186,4%	35,0%	-47,6%
50%RMA	36,5%	19,5%	21,0%	55,4%	43,5%	44,6%
75%RMA	-245,0%	-53,6%	-85,2%	-142,3%	-7,8%	-30,0%
100%RMA	-68,1%	-50,2%	-53,3%	-18,0%	-5,5%	-7,6%

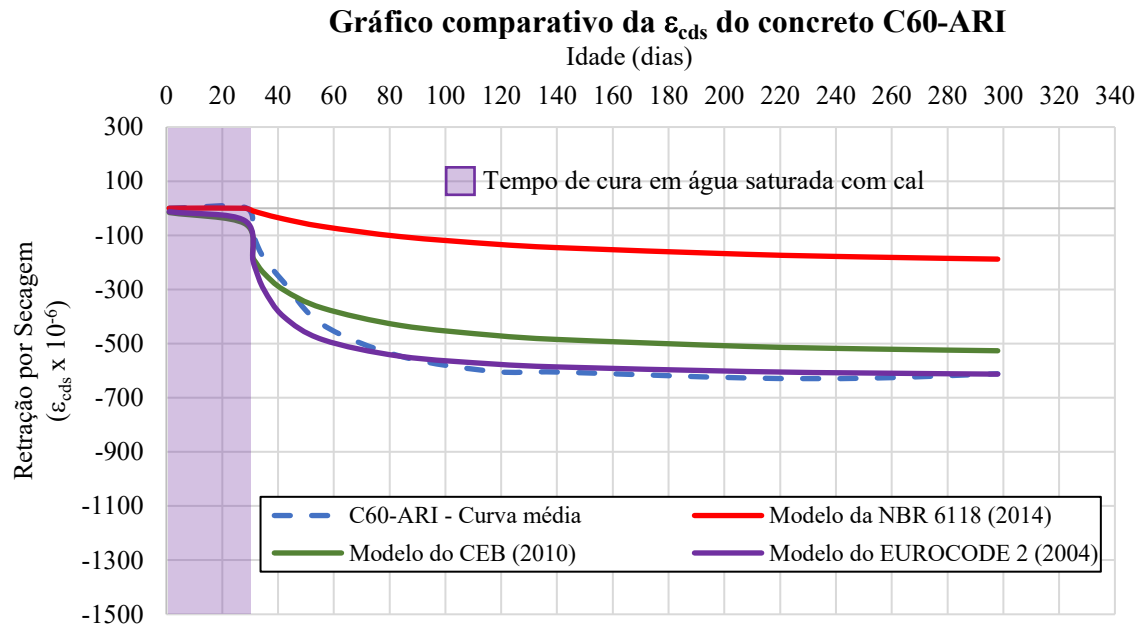
Para os concretos produzidos com RCA, pode-se verificar no Gráfico 20 (a), (b) e (c) e na Tabela 40 que nas idades avaliadas, o comportamento da retração autógena apresentado por esses concretos mais aproximou do mais do comportamento indicado pelo CEB-*fip* (2010). Já o concreto com 100% de RCA, é possível verificar no Gráfico 20 (d) e na Tabela 40 que o comportamento deste concreto foi próximo de 60% superior ao indicado pelo Eurocode 2 (2004) e próximo de 43% superior ao indicado pelo CEB-*fip* (2010).

Para os concretos com 25% e 50% de tijolo, é possível observar no Gráfico 21 (a) e (b) e na Tabela 40 que até a idades de 28 dias o código que melhor representou o comportamento desses concretos foi o descrito pelo CEB-*fip* (2010), já as idades superiores a 28 dias, é possível verificar no Gráfico 20 (a) e (b) que a retração autógena destes concretos apresentou um comportamento intermediário ao descrito pelas normas analisadas.

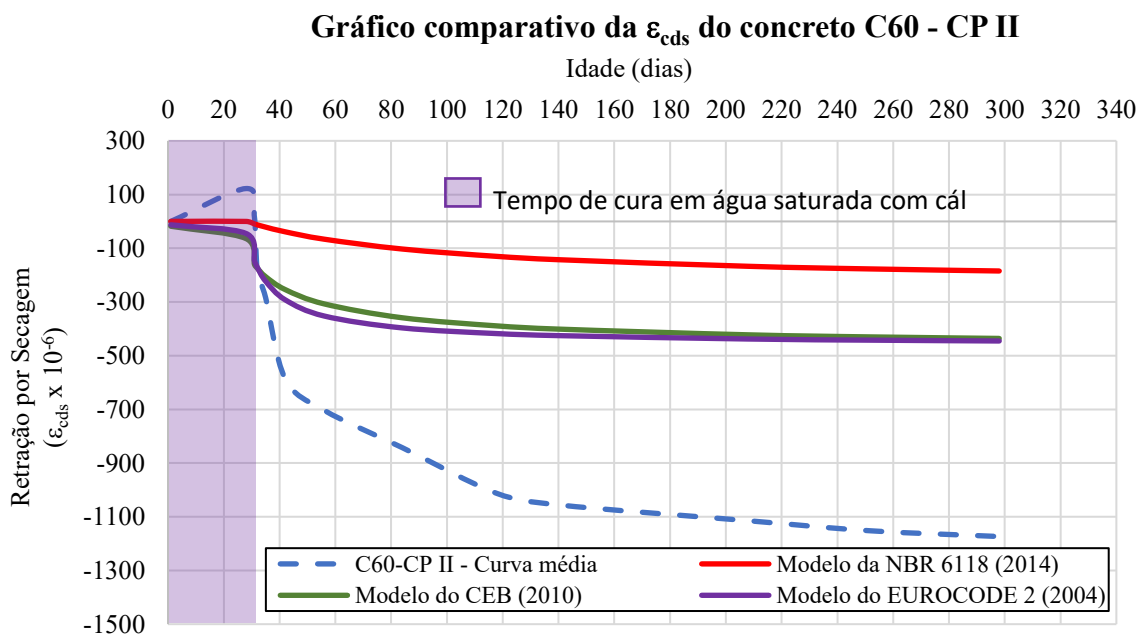
Para os concretos com 75% e 100% de substituição no agregado natural por agregado reciclado de tijolo, é possível verificar no Gráfico 21 (c) e (d) e na Tabela 40 que a retração autógena desses concretos apresentou um comportamento mais próximo ao comportamento descrito pelo Eurocode 2 (2004).

No Gráfico 22 (a) e (b) serão apresentados a avaliação comparativa entre a retração por secagem dos concretos de classe de resistência de 60MPa obtida experimentalmente e as normas ABNT NBR 6118 (2014), CEB-fip (2010) e o Eurocode 2 (2004).

Gráfico 22: Gráficos comparativos da retração por secagem experimental com as normas: (a) concreto C60-ARI e (b) C60-CP II.



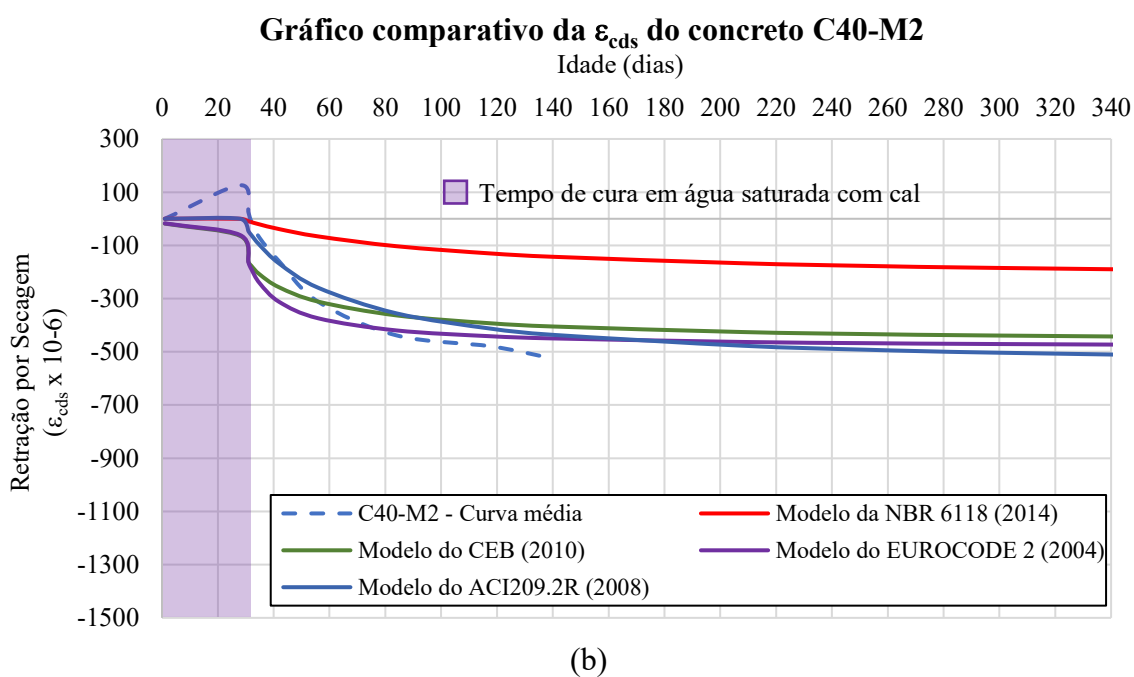
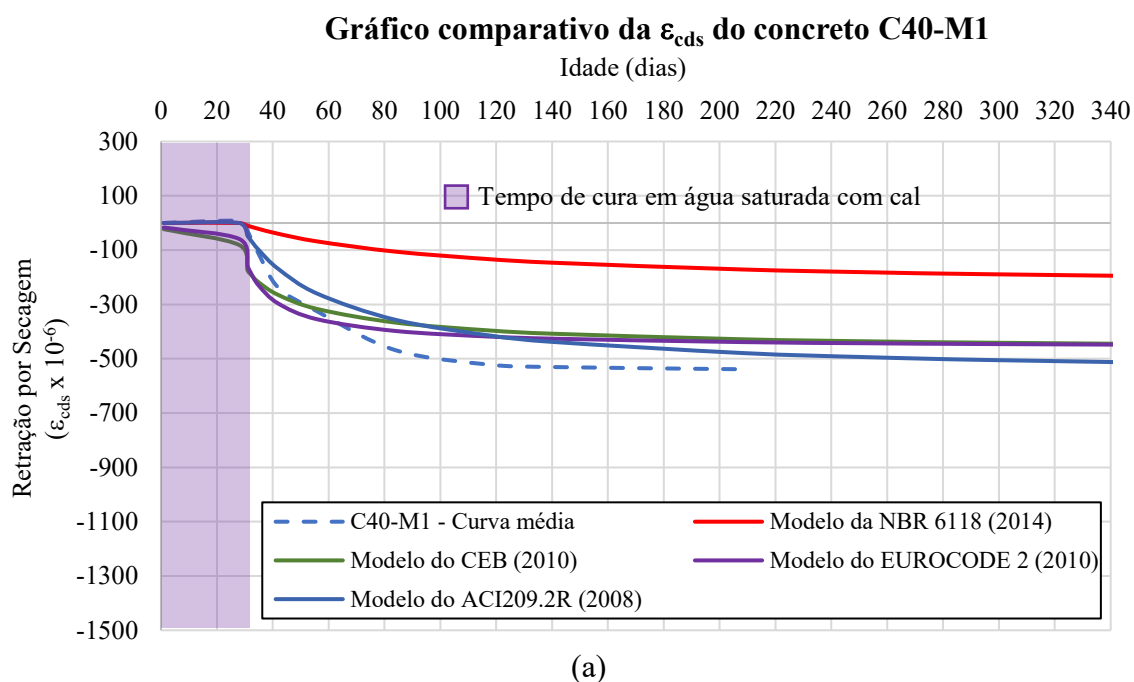
(a)



(b)

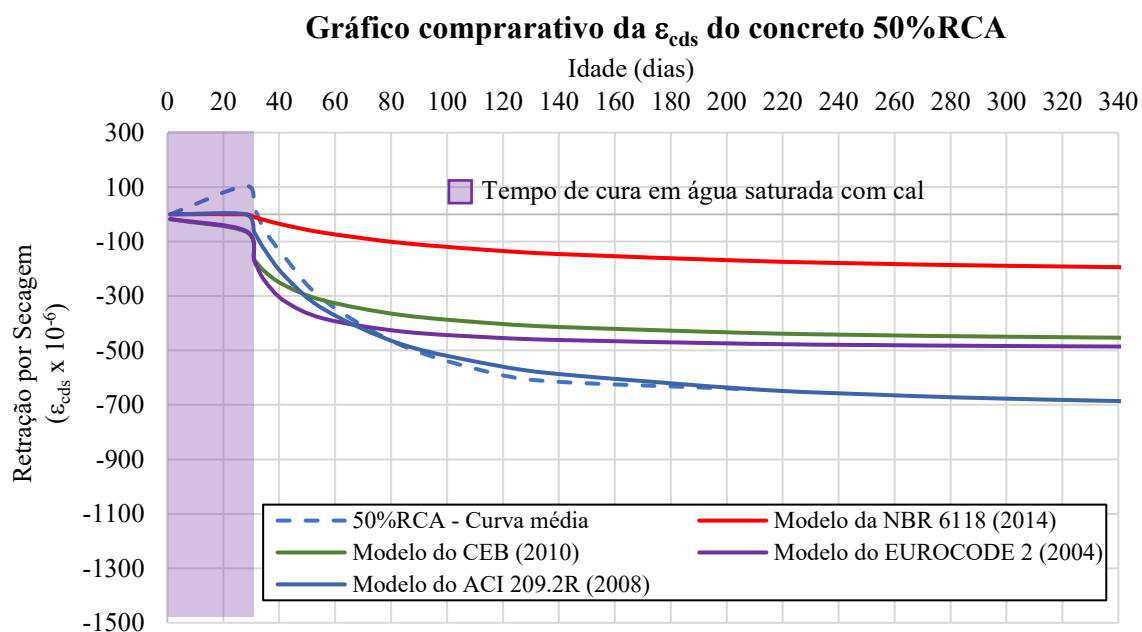
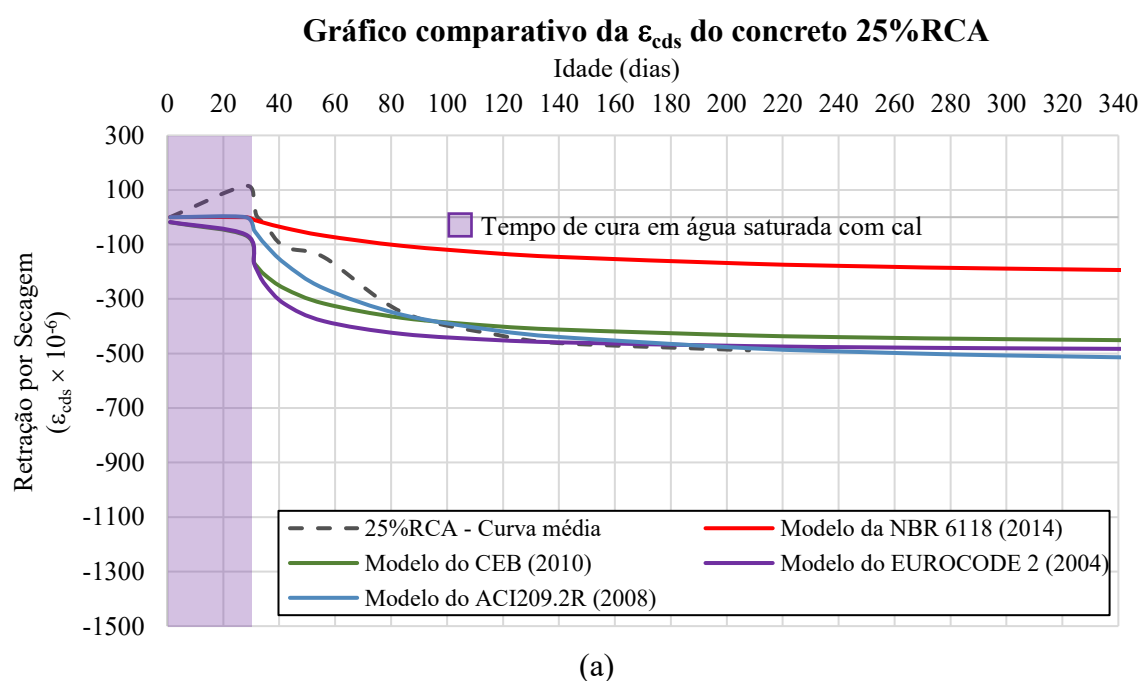
No Gráfico 23 (a) e (b) serão apresentados os valores obtidos experimentalmente da retração dos concretos de classe de resistência de 40MPa e as normas ABNT NBR 6118 (2014), CEB-fip (2010) e o Eurocode 2 (2004) e ACI 209.2R (2008),

Gráfico 23: Gráficos comparativos da retração por secagem experimental com as normas: (a) concreto C40-M1 e (b) C40-M2.



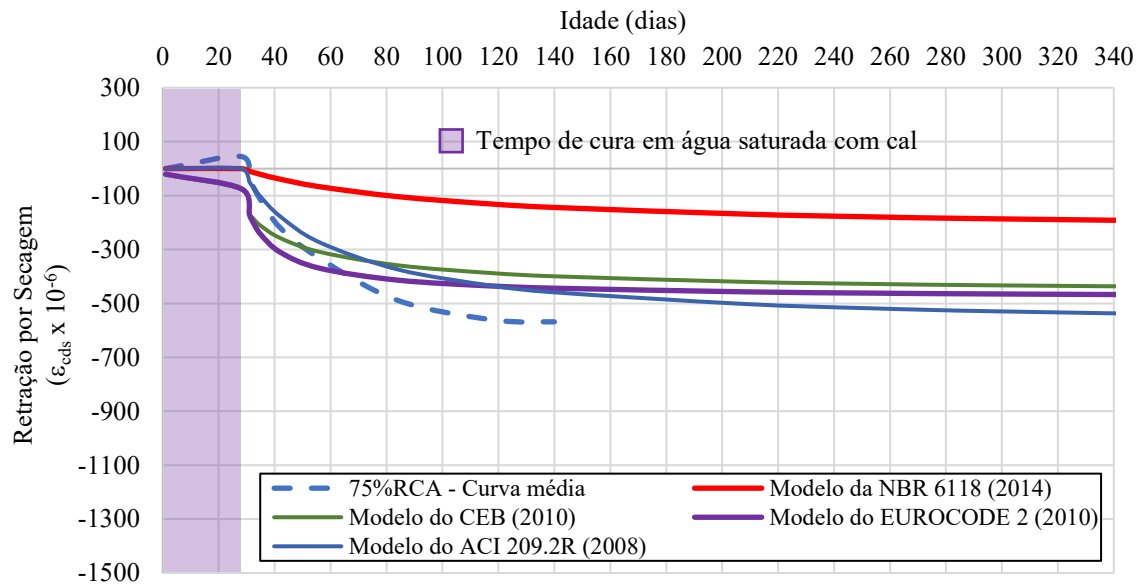
No Gráfico 24 (a), (b), (c) e (d) serão apresentados os valores obtidos experimentalmente da retração dos concretos produzidos com RCA as normas ABNT NBR 6118 (2014), CEB-fip (2010) e o Eurocode 2 (2004) e ACI 209.2R (2008) e, por fim, no Gráfico 25 (a), (b), (c) e (d) serão apresentados os valores obtidos experimentalmente da retração dos concretos produzidos com RMA as normas ABNT NBR 6118 (2014), CEB-fip (2010) e o Eurocode 2 (2004) e ACI 209.2R (2008).

Gráfico 24: Gráficos comparativos da retração por secagem experimental com as normas: (a) concreto 25%RCA, (b) 50%RCA, (c) 75%RCA e (d) 100%RCA.



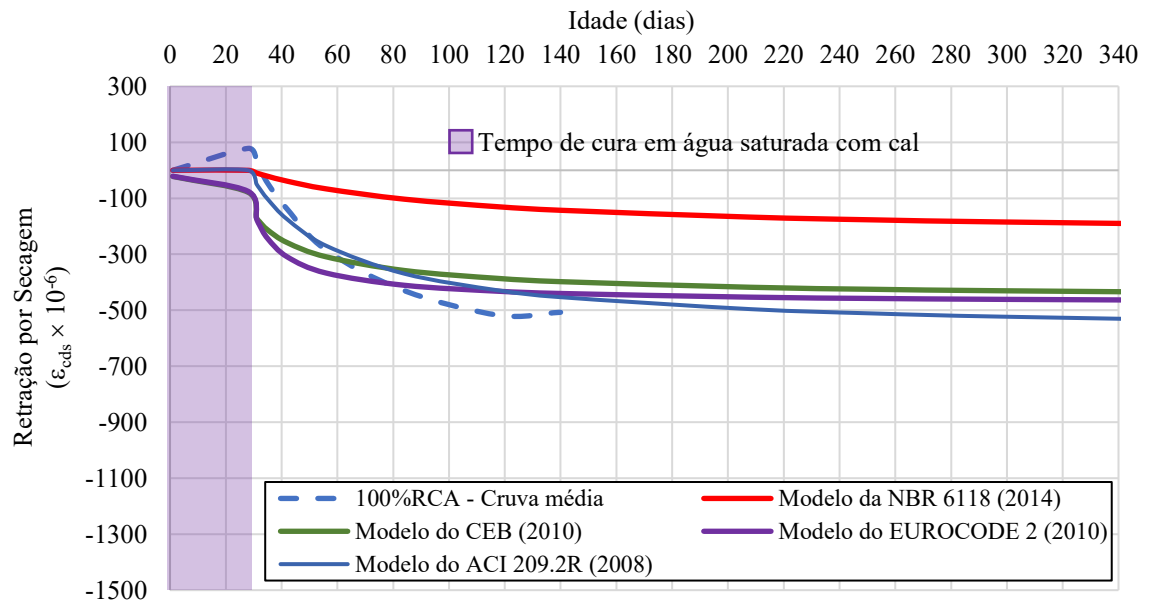
(b)

Gráfico comparativo da ϵ_{cds} do concreto 75%RCA



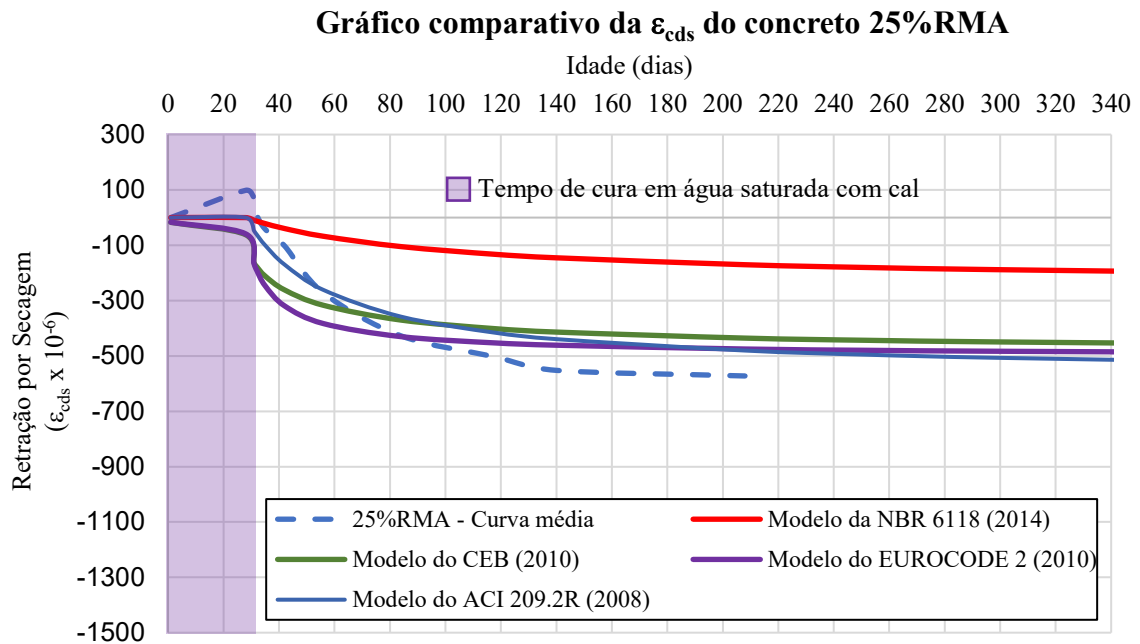
(c)

Gráfico comparativo da ϵ_{cds} do concreto 100%RCA

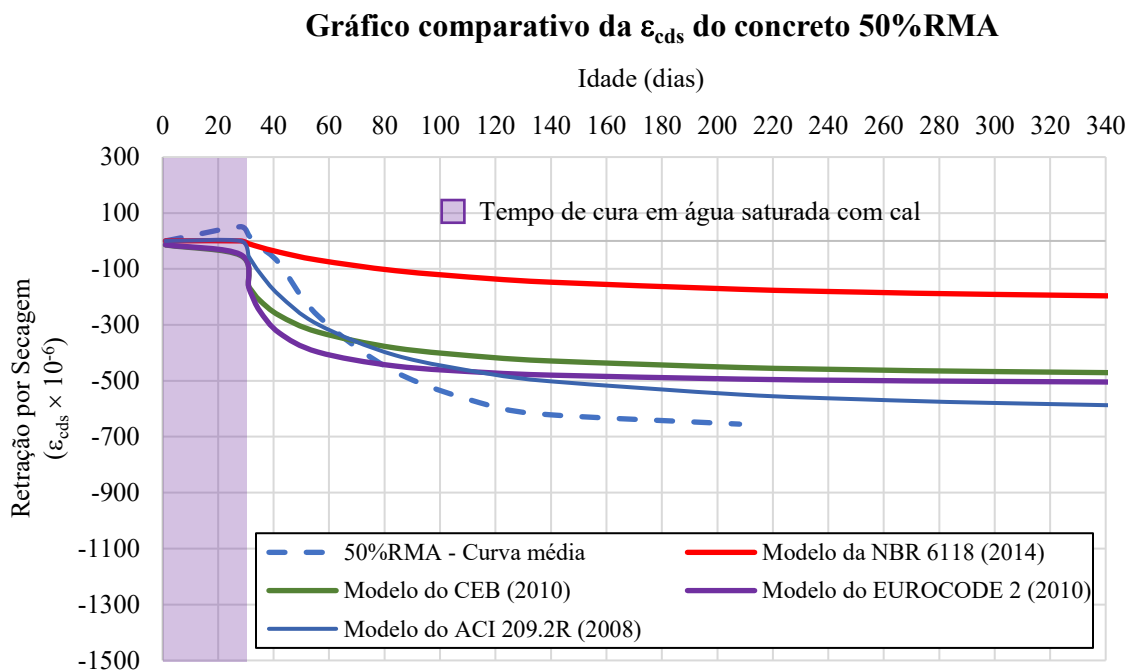


(d)

Gráfico 25: Gráficos comparativos da retração por secagem experimental com as normas: (a) concreto 25%RMA, (b) 50%RMA, (c) 75%RMA e (d) 100%RMA.

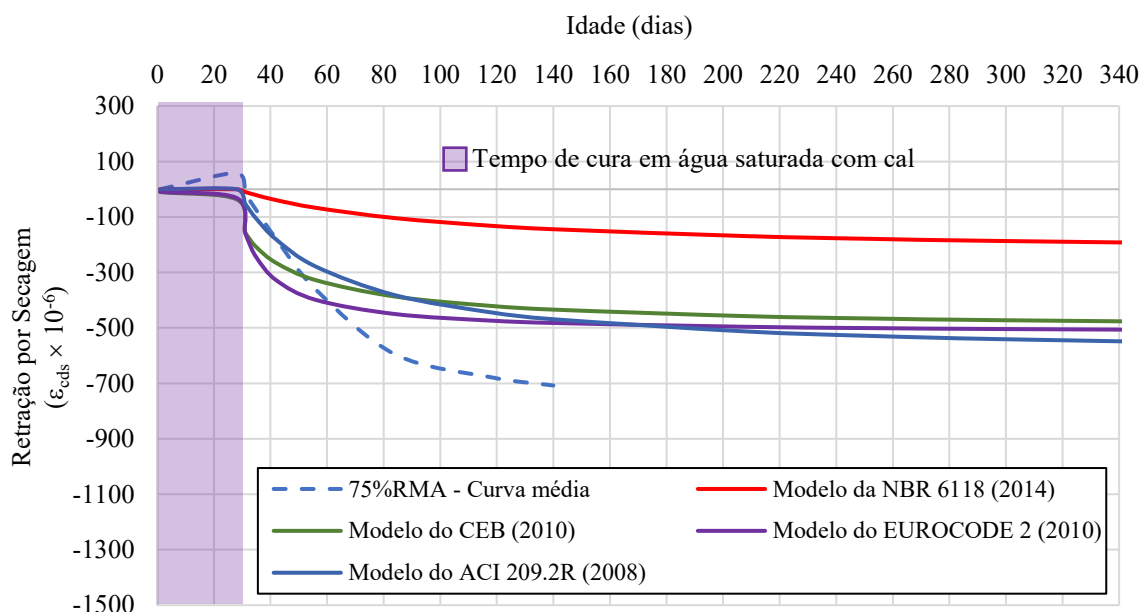


(a)



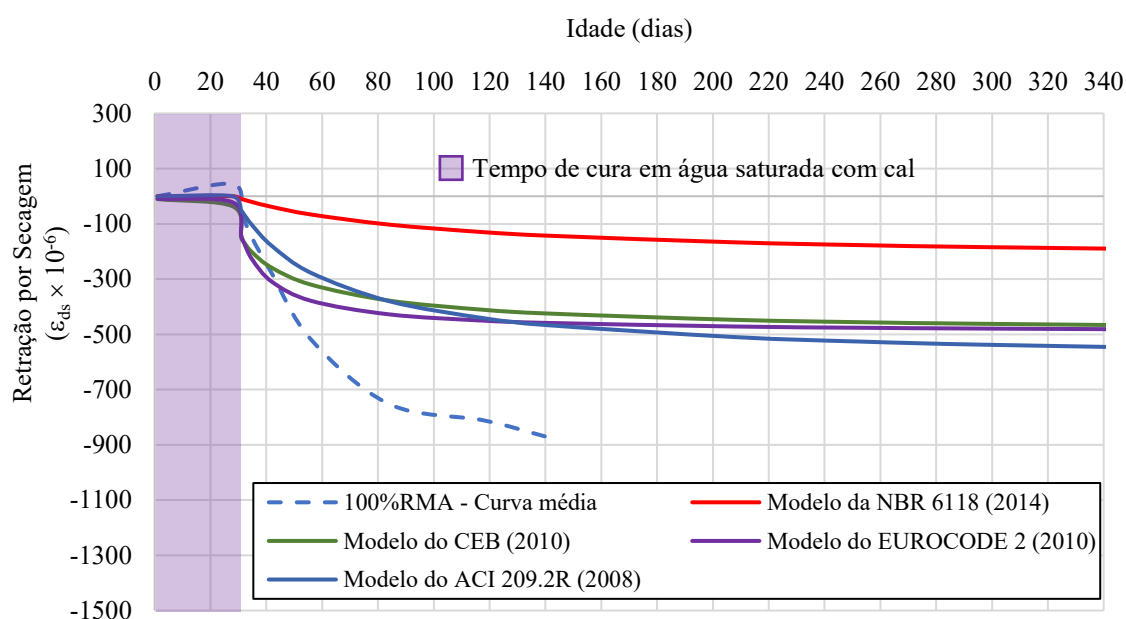
(b)

Gráfico comparativo da ϵ_{cds} do concreto 75%RMA



(c)

Gráfico comparativo da ϵ_{cds} do concreto 100%RMA



(d)

É possível observar no Gráfico 22 (a), Gráfico 23 e Gráfico 24 que os concretos C60-ARI, C40-M1, C40-M2, 25%RCA, 50%RCA, 75%RCA e 100%RCA apresentaram comportamento similar ao modelo normativo do ACI 209.2R (2008). Já os concretos 25%RMA, 50%RMA e 75%RMA é possível verificar no Gráfico 25 (a), (b) e (c) que estes concretos apresentaram comportamento inferior ao apontado pelas normas até próximo a idade de 40 dias. A partir de 60 dias de idade, os concretos produzidos estes concretos apresentaram valores de retração por secagem superior ao indicado pelos códigos.

O concreto C60-CP2 apresentou um comportamento a secagem diferente dos demais concretos, apresentando valores de retração superiores aos códigos logo nas primeiras idades.

5.2. Avaliação dos resultados de retração com a bibliografia utilizada

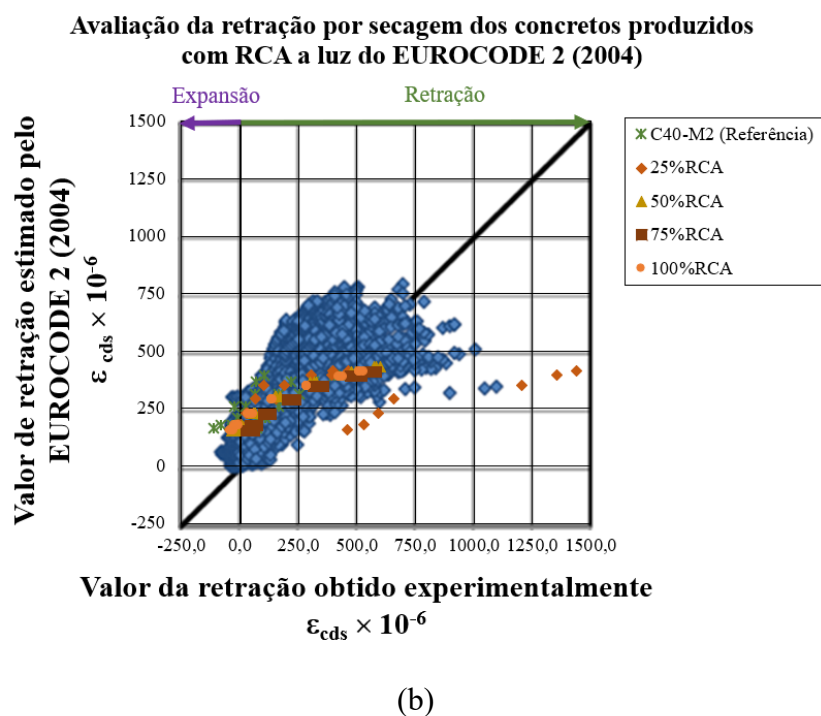
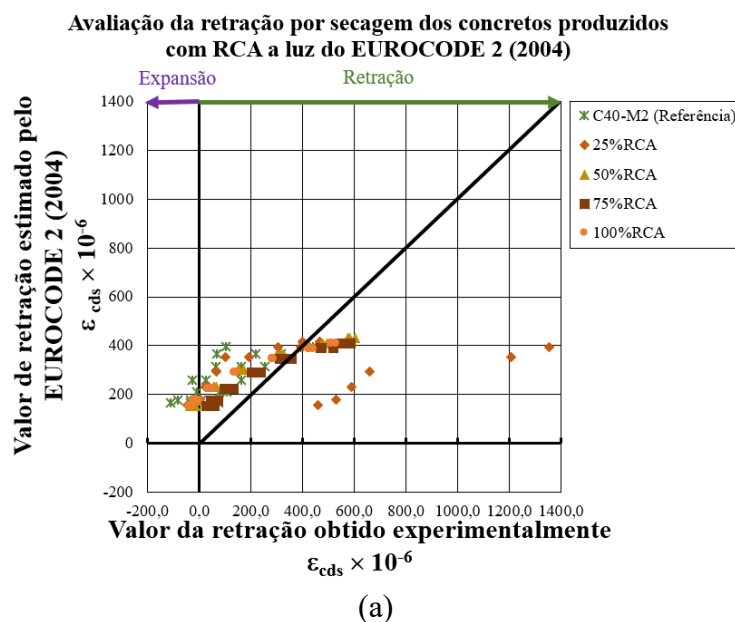
Para avaliar os valores obtidos experimentalmente frente ao encontrado pela bibliografia internacional foi elaborado o Gráfico 26 e o Gráfico 27. Nestes gráfico, os resultados de retração por secagem obtidos experimentalmente se encontram sobrepostos aos gráficos apresentados por Silva *et al.* (2015) e por Lye *et al.* (2016), pois estes autores realizaram estudos de retração por secagem em concretos com substituição do agregado graúdo natural por agregados de RCA.

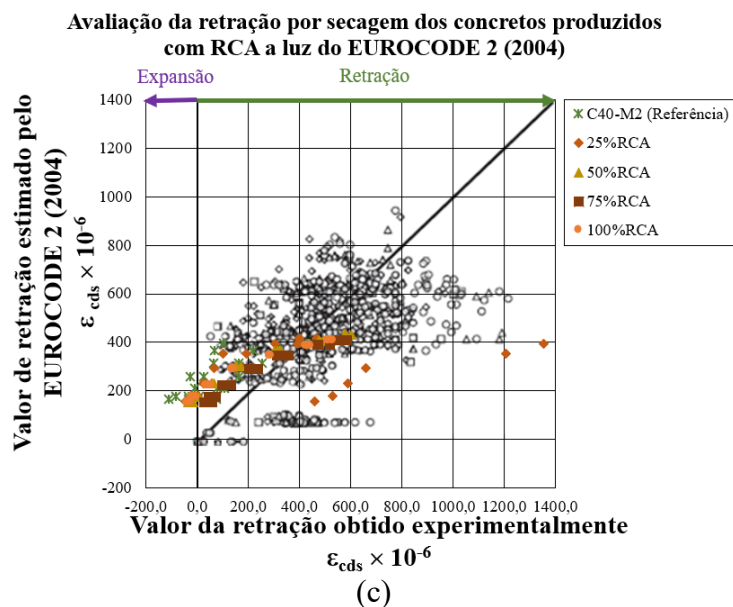
Diante disto, no Gráfico 26 (a) é apresentado o comparativo da retração por secagem experimental dos concretos produzidos com RCA com o Eurocode 2 (2004), no Gráfico 26 (b) o gráfico é sobreposto ao gráfico apresentado por Silva *et al.* (2015) e no Gráfico 26 (c) o mesmo gráfico é sobreposto ao gráfico apresentado na obra de Lye *et al.* (2016).

Já no Gráfico 27 (a) é apresentado o comparativo da retração por secagem experimental dos concretos produzidos com RCA com o ACI 209.2R (2008), no Gráfico 27 (b) o gráfico é sobreposto ao gráfico apresentado por Silva *et al.* (2015) e no Gráfico 27 (c) o mesmo gráfico é sobreposto ao gráfico apresentado na obra de Lye *et al.* (2016).

Nos gráficos apresentados a seguir, o eixo x representa a retração obtida experimentalmente e no eixo y a retração indicada pelo código normativo avaliado. Desta forma, os pontos situados na região abaixo da diagonal do gráfico indicam que a retração obtida experimentalmente foi superior a indicado pelo código, já os pontos situados na região acima da diagonal representam a situação na qual o código apresentou valores de retração superiores ao encontrado experimentalmente. Os pontos situados na diagonal do gráfico representam uma condição na qual a retração obtida experimentalmente apresentou o mesmo valor que o indicado pelo código avaliado.

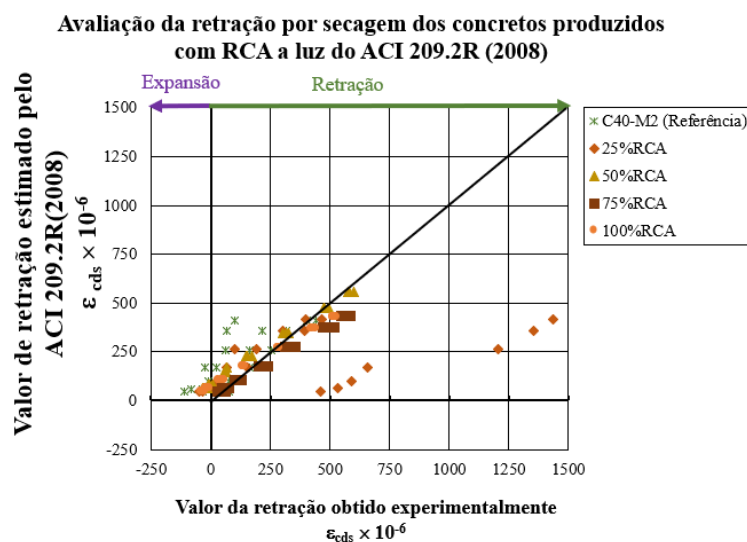
Gráfico 26 – Avaliação comparativa da retração obtida experimentalmente nos concretos produzidos com RCA (a) com o Eurocode 2 (2004), (b) com o obtido por SILVA *et al.* (2015) e (c) com o obtido por Lye *et al.* (2016).

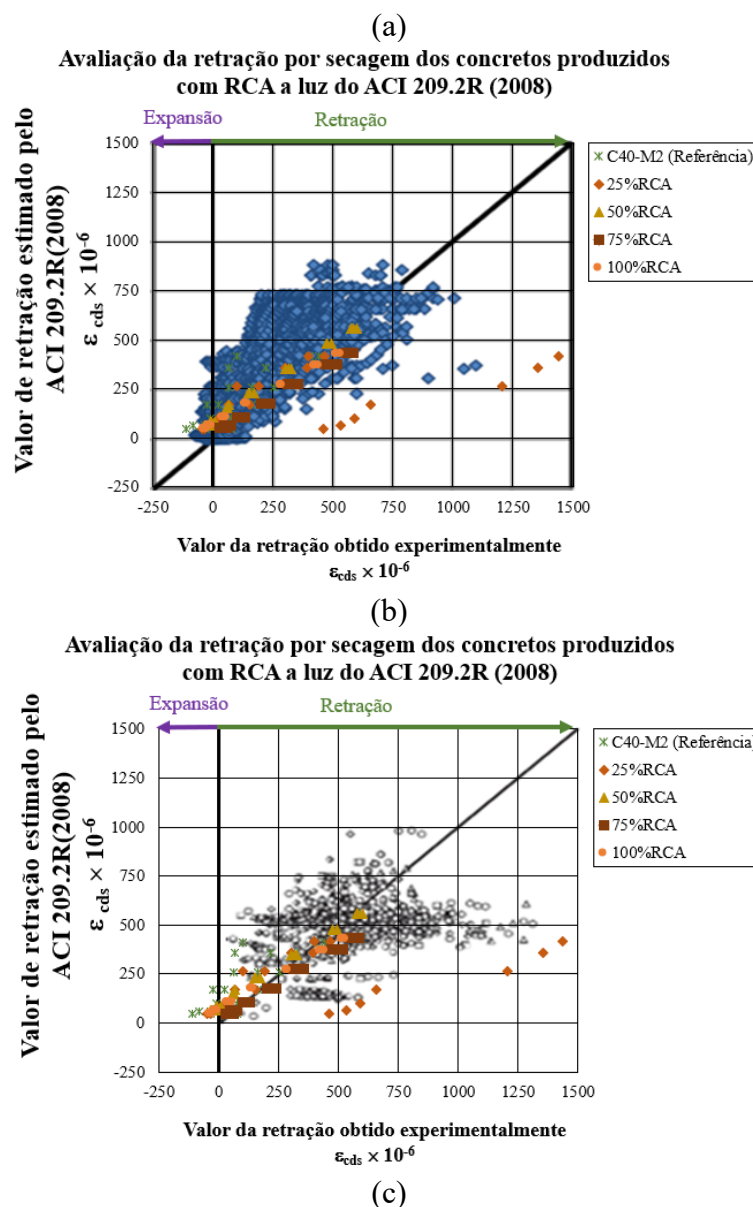




É possível observar no Gráfico 26 (a) que, ao verificar uma boa correlação dos valores obtidos experimentalmente com o Eurocode 2 (2004), os valores encontrados experimentalmente se apresentam ligeiramente afastados para cima da linha diagonal. Todavia, é possível observar no Gráfico 26 (b) que os valores apresentados por Silva *et al.* (2015) também apresentaram uma boa correlação com o modelo do Eurocode 2 (2004), já no trabalho realizado por Lye *et al.* (2016), é possível verificar que a nuvem de pontos encontra-se distribuída no entorno da linha central.

Gráfico 27 – Avaliação comparativa da retração obtida experimentalmente nos concretos produzidos com RCA com (a) o ACI 209.2R (2008), (b) com o obtido por Silva *et al.* (2015) e (c) com o obtido por Lye *et al.* (2016).





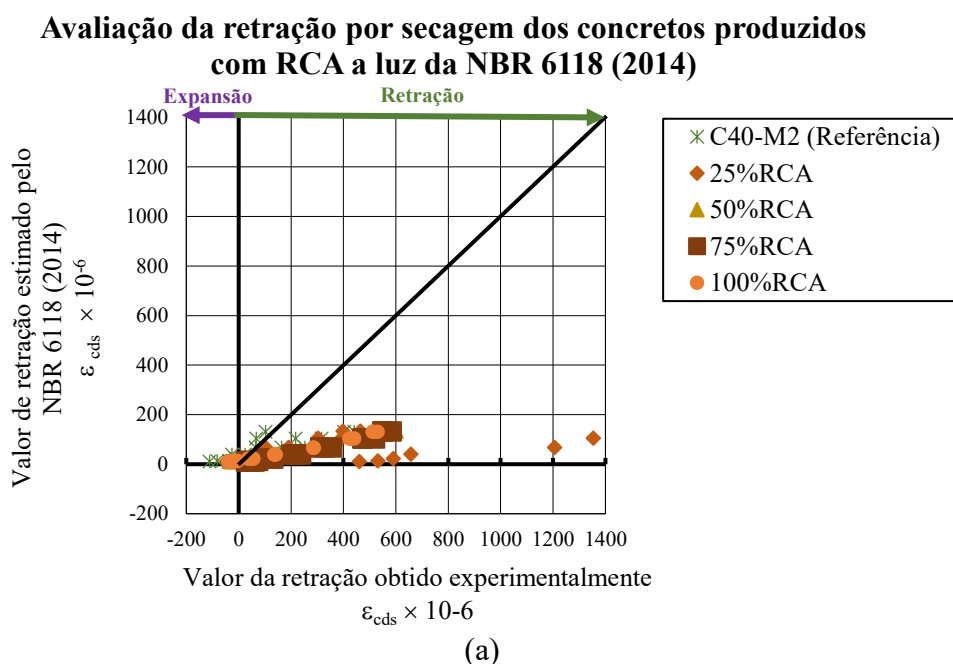
É possível observar no Gráfico 27 (a) que, ao verificar uma boa correlação dos valores obtidos experimentalmente com o ACI 209.2R (2008), os valores encontrados experimentalmente se apresentaram próximos a linha diagonal, indicando uma boa aderência dos valores obtidos ao código. É possível observar no Gráfico 27 (b) que os valores apresentados por Silva *et al.* (2015) se apresentaram ligeiramente afastados da linha diagonal mas, no trabalho realizado de Lye *et al.* (2016), os valores da nuvem de dispersão deste autor apresentaram comportamento similar ao obtido neste trabalho.

É possível verificar no Gráfico 26 e no Gráfico 27 que os valores obtidos experimentalmente encontram-se dentro da nuvem de pontos encontradas pela bibliografia, com exceção do espécime CP 2 do concreto de 25% de RCA. Todavia, conforme apresentado no Item 4.3, este espécime deve ser retirado da análise.

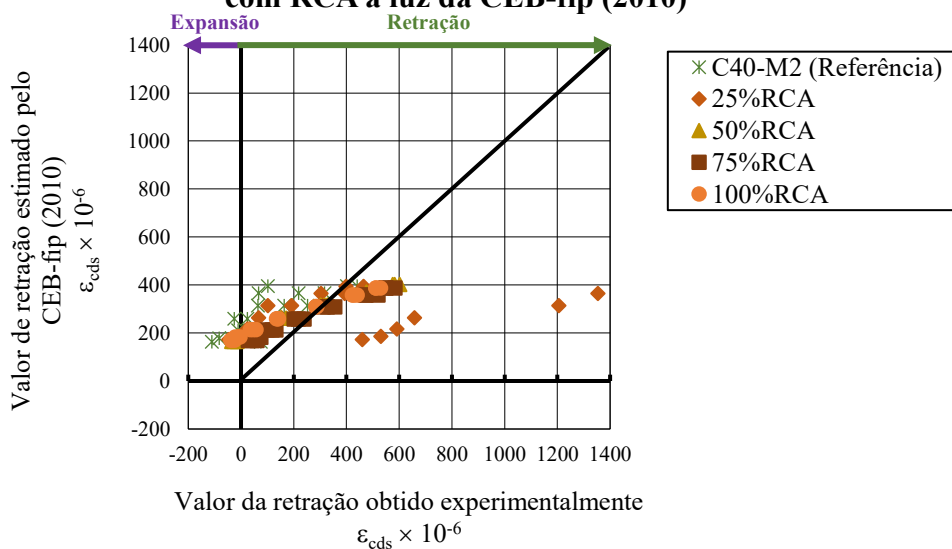
Diante do apresentado, é possível verificar a concordância dos valores obtidos experimentalmente com a bibliografia adotada nesta obra. Diante disto, a mesma avaliação foi realizada para os códigos CEB-*fip* (2010) e pela ABNT NBR 6118 (2014) para os concretos com RCA.

É possível verificar no Gráfico 28 (a) que a norma brasileira não foi eficaz em prever a magnitude da retração para a condição ensaiada. Já o código CEB-*fip* (2010) apresentou comportamento semelhante ao verificado pelo Eurocode 2 (2004), de modo que inicialmente os pontos encontram-se acima da linha diagonal, indicando condição conservativa, e com o decorrer do tempo de exposição, o código passa a apresentar valores inferiores ao encontrado experimentalmente.

Gráfico 28 – (a) Avaliação comparativa da retração obtida experimentalmente nos concretos produzidos com RCA com (a) a NBR 6188 (2014) e (b) o CEB-*fip* (2010).



Avaliação da retração por secagem dos concretos produzidos com RCA a luz da CEB-fip (2010)

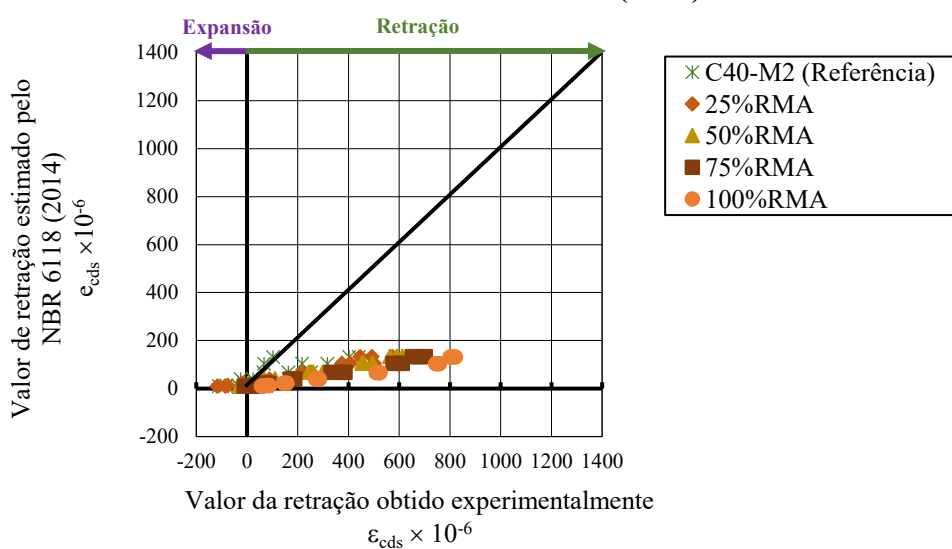


(b)

Semelhante ao realizado com os concretos produzidos com RCA, no Gráfico 29 é possível avaliar a correlação dos códigos utilizados com os valores obtidos experimentalmente de retração nos concretos produzidos com substituição do agregado natural por RMA.

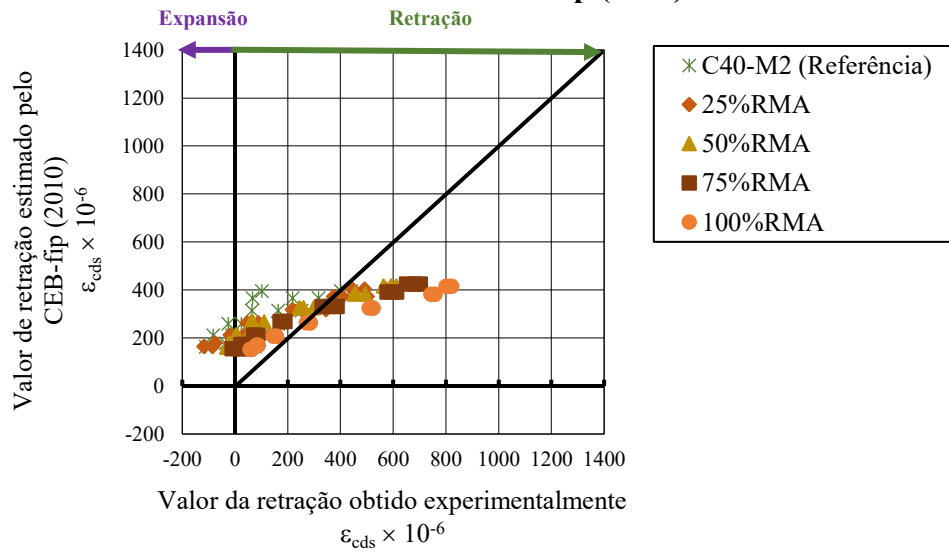
Gráfico 29 – Avaliação comparativa da retração obtida experimentalmente nos concretos produzidos com RMA com (a) a NBR 6118 (2014), (b) o CEB-*fip* (2010), (c) o Eurocode 2 (2004) e (d) o ACI 209.2R (2008).

Avaliação da retração por secagem dos concretos produzidos com RMA a luz da NBR 6118 (2014)



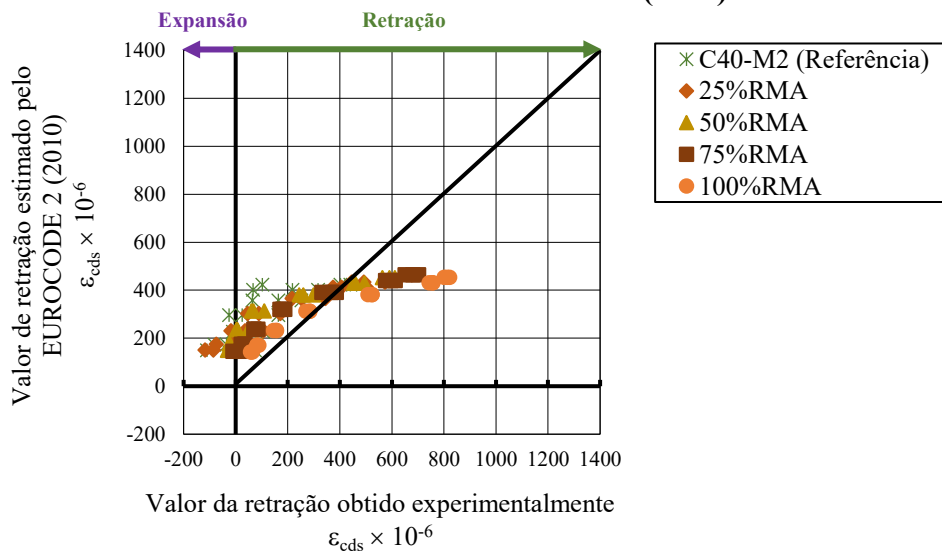
(a)

Avaliação da retração por secagem dos concretos produzidos com RMA a luz do CEB-fip (2010)



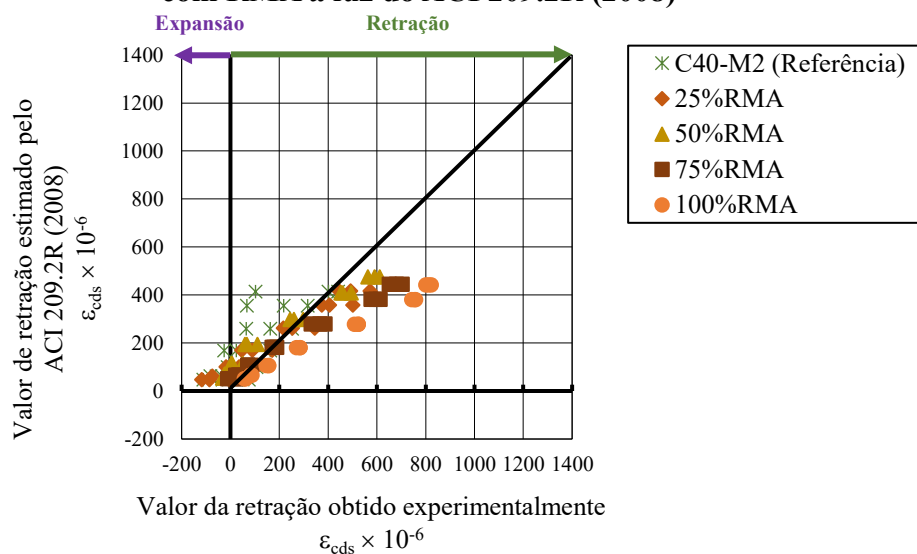
(b)

Avaliação da retração por secagem dos concretos produzidos com RMA a luz do EUROCODE 2 (2004)



(c)

Avaliação da retração por secagem dos concretos produzidos com RMA a luz do ACI 209.2R (2008)



(d)

É possível verificar no Gráfico 29 que, semelhante ao ocorrido com o concreto produzido com agregado de RCA, a NBR 6118 (2014) não apresentou boa aderência ao encontrado experimentalmente. Já para os códigos CEB-*fip* (2010) e Eurocode 2 (2004) se apresentaram conservativos nas primeiras idades porém, a partir dos 56 dias de secagem, os valores obtidos experimentalmente foram superiores aos valores indicados por esses códigos. Também é possível constatar que para estes códigos internacionais há um ligeiro afastamento dos valores encontrados com a linha diagonal.

Para o caso do ACI 209.2R (2008), é possível observar que este código apresentou um bom ajuste aos valores encontrados experimentalmente pois, os pontos encontram-se próximos a linha diagonal.

Conforme o apresentado, é possível constatar nos gráficos apresentados, é possível constatar que o código ACI 209.2R (2008) foi aquele que melhor representou a retração obtida experimentalmente.

Conforme apresentado no Item 1.2.4, Lye *et al.* (2016) apresentaram equações para correlacionar a relação percentual da retração dos concretos produzidos com agregado graúdo de RCA e o concreto de referência. Para a faixa de resistência utilizada nos concretos ensaiados Lye *et al.* (2016) apresentou a Equação 3.

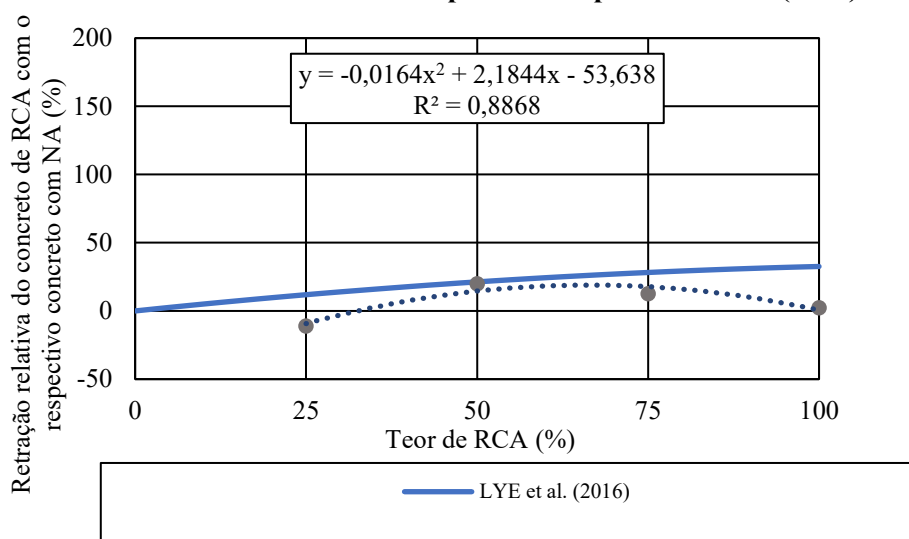
Esta equação correlaciona a retração do concreto contido na faixa de resistência de 40MPa até 50MPa com o referente concreto produzido com RCA. Assim, utilizado os valores

apresentados na Tabela 35 e Tabela 36, os valores obtidos serão confrontados com os valores de relação percentual indicado pelos autores.

Assim, no Gráfico 30(a), pode ser encontrada a avaliação da relação percentual dos concretos produzidos com RCA e no Gráfico 30 (b) a avaliação do concreto produzido com RMA e a equação.

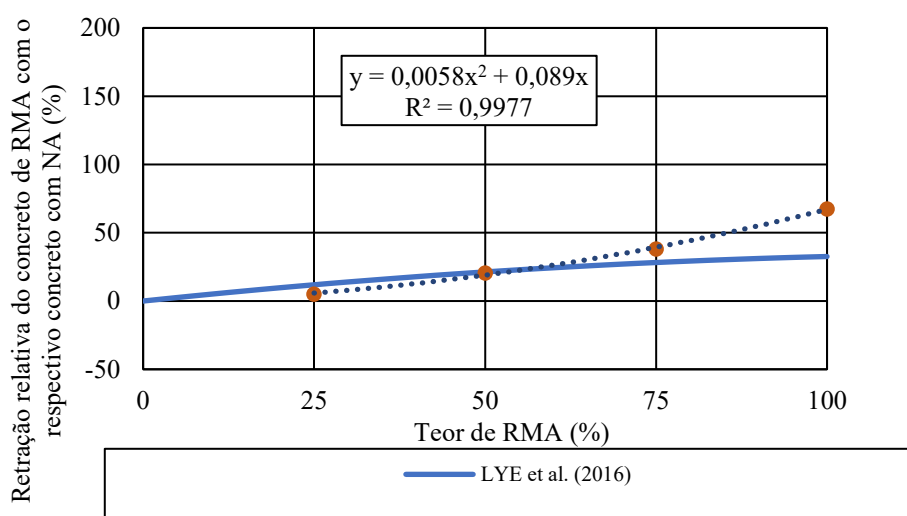
Gráfico 30 – Avaliação da relação percentual entre o concreto produzido com agregados reciclados com o concreto de referência frente a Equação 3.

Avaliação da retração em concretos com resistência na faixa de com RCA de acordo com o apresentado por LYE et al. (2016)



(a)

Avaliação da retração em concretos com resistência na faixa de com RMA de acordo com o apresentado por LYE et al. (2016)

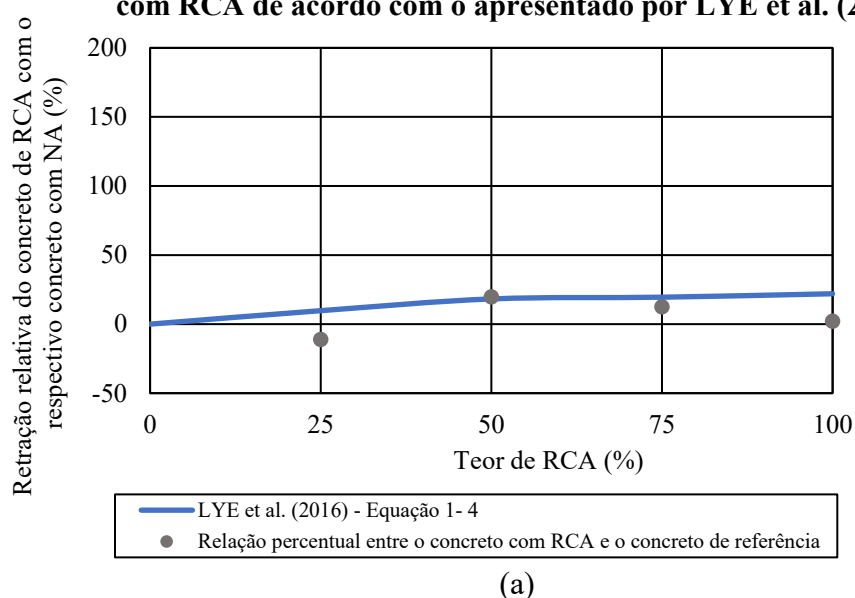


(b)

Todavia, Lye *et al.* (2016) também apresentaram a Equação 4 para correlacionar percentualmente a retração de concretos produzidos com RCA com o concreto de referência. Nesta equação, os autores utilizam as condições de umidade do meio e a resistência do concreto para corrigir a relação da retração. Assim, os concretos produzidos com RCA foram avaliados frente a esta equação e, para fins comparativos, os concretos produzidos com RMA também foram comparados os respectivos valores indicados pela equação.

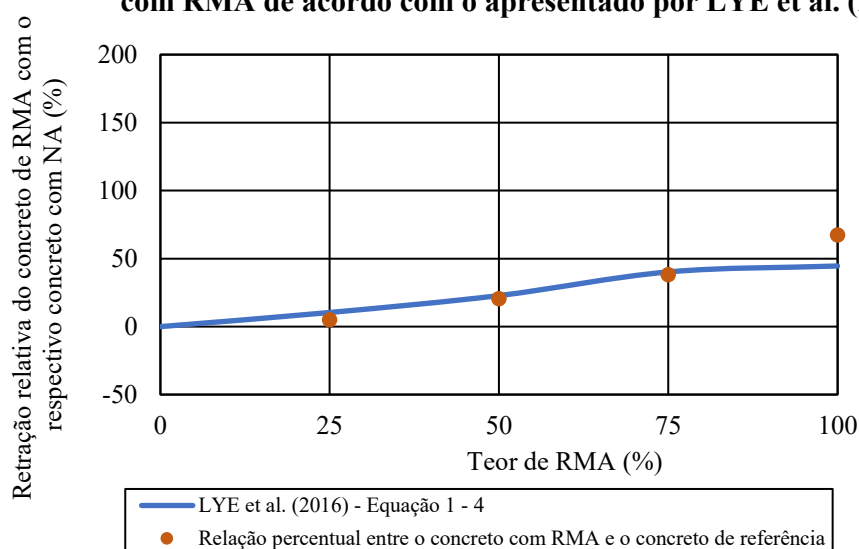
Gráfico 31 – Avaliação da relação percentual entre o concreto produzido com agregados reciclados com o concreto de referência frente a Equação 4

Avaliação da retração em concretos com resistência na faixa de com RCA de acordo com o apresentado por LYE et al. (2016)



(a)

Avaliação da retração em concretos com resistência na faixa de com RMA de acordo com o apresentado por LYE et al. (2016)



(b)

É possível observar no Gráfico 31 (a) que os valores obtidos experimentalmente em concretos com RCA apresentaram valores inferiores ao apontado pela Equação 4 mas, o concreto com 50% de substituição apresentou relação percentual semelhante ao indicado pela equação avaliada, Tabela 41.

Ao avaliar o concreto produzido com agregado reciclado de tijolo, é possível observar no Gráfico 31 (b) que a Equação 4, indicado Lye *et al.* (2016) para concretos com RCA, apresentou uma boa aderência ao encontrado experimentalmente até a faixa de substituição de 75%. Porém, para a substituição de 100% do agregado natural por RMA, a relação percentual encontrada experimental foi de 1,51.

Tabela 41 – Relação entre as relações percentuais obtidas experimentalmente e a relação percentual indicada pela Equação 4 indicada por Lye *et al.* (2016).

Concreto	Experimental (%)	Lye <i>et al.</i> (2016) Equação 4: cálculo do Rel_{ε} (%)	$\frac{Exp}{Rel_{\varepsilon}}$
25%RCA	-11,03	9,7	-1,14
50%RCA	19,74	18,3	1,08
75%RCA	12,57	19,5	0,64
100%RCA	2,29	22,0	0,10
25%RMA	5,05	10,4	0,49
50%RMA	20,58	22,8	0,90
75%RMA	38,08	40,2	0,95
100%RMA	67,44	44,6	1,51

5.3. Análise de covariância da retração por secagem dos concretos produzidos (ANOVA)

Para avaliar a similaridade dos valores de retração por secagem encontrados nos concretos produzidos ao longo deste trabalho, foi realizada uma análise de covariância, ANOVA, através do programa R 3.6.1. Para realizar a avaliação POST-HOCK, foi adotado o método de Tukey, e esta avaliação também foi realizada no programa R 3.6.1.

Foram realizadas 4 combinações de concretos nas análises de covariâncias, sendo estas:
Análise 1 – Concretos convencionais – C60-ARI, C60-CP2, C40-M1 e C40-M2,

Análise 2 – Concreto C40-M2 vs concretos com RCA - C40-M2, 25%RCA, 50%RCA, 75%RCA e 100%RCA,

Análise 3 – Concreto C40-M2 vs concretos com RMA - C40-M2, 25%RMA, 50%RMA, 75%RMA e 100%RMA,

Análise 4 – Todos os concretos – C60-ARI, C60-CP2, C40-M1 e C40-M2, 25%RCA, 50%RCA, 75%RCA e 100%RCA, 25%RMA, 50%RMA, 75%RMA e 100%RMA.

A análise de covariância foi realizada para a idade de 3 dias, 4 dias, 7 dias, 14 dias, 28 dias, 56 dias, 3 meses e 16 semanas. A idade máxima de leitura foi a de 16 semanas pois esta era a idade apresentada pelo espécime mais jovem (Concreto C40-M2).

Na Tabela 42, encontra-se apresentado um resumo dos resultados obtidos através da ANOVA.

Tabela 42 – Tabela resumo da ANOVA.

Combinação	Idade da ANOVA							
	3 dias	4 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	3 meses	16 semanas
Análise 1	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Análise 2	S	S	S	S	NS	S	NS	S
Análise 3	S	S	S	NS	NS	S	NS	NS
Análise 4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

S – ANOVA indica similaridade entre os concretos avaliados nesta idade,

NS – ANOVA indica que ao menos um dos concretos não é similar aos demais.

Diante do apresentado na Tabela 42, é possível observar na Análise 1 que a classe de resistência e o tipo de cimento influenciou diretamente na magnitude da retração medida pois, com 3 dias de secagem, a ANOVA apontou que ao menos um dos concretos apresentou comportamento diferente dos demais, porém essa diferença não foi significativa para que a análise POST-HOCK apresentasse combinação inferior a 5%. Todavia, é possível observar nesta idade que a combinação C40-M2 vs C60-ARI apresentou valor próximo ao limite.

Com 4 dias de secagem, ao realizar a análise POST-HOCK, já foi possível identificar que a diferença entre a combinação C40-M2 vs C60-CP2. A combinação C40-M2 vs C60-ARI e C40-M1 vs C60-CP2 apresentaram valores próximos ao limite do intervalo de confiança.

Com 7 dias de secagem, ao realizar a análise POST-HOCK, foi possível identificar que a diferença entre a combinação C40-M2 vs C60-CP2. A combinação C40-M1 vs C60-CP2 permanece apresentando valor próximo ao limite do intervalo de confiança.

Com 14 dias até 16 semanas de secagem foi possível identificar que existe diferença entre as combinações C60-CP2 vs C60-ARI, C40-M1 vs C60-CP2 e C40-M2 vs C60-CP2. Assim, nesta idade, o comportamento do concreto C60-CP2 foi diferente dos demais concreto.

Desta forma, através desta análise, pode-se concluir que o tipo de cimento utilizado não apresentou variação na retração por secagem nos primeiros 7 dias de secagem porém, ao longo da secagem este parâmetro passa a influenciar na magnitude da retração. Tal fato pode ser observado a diferença apresentada pela combinação C60-CP2 vs C60-ARI.

Ao avaliar a classe de resistência do concreto, é possível observar através das combinações C40-M1 vs C60-CP2 e C40-M2 vs C60-CP2 que, apesar destes terem sido produzidos com o mesmo tipo de cimento, a resistência do concreto influenciou na magnitude da retração. Tal fato corrobora com o prescrito pelos códigos internacionais.

Outro ponto a ser observado nesta análise é que a combinação C40-M1 vs C40-M2 não apresentou diferença nas idades avaliadas, indicando que a variação do fator a/c de 0,35 para 0,38 pouco influenciou na magnitude da retração.

A Análise 2 teve por objetivo avaliar a influência da substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo de RCA na magnitude da retração. Conforme apresentado na Tabela 42, é possível observar que a análise da covariância identificou diferença significativa da magnitude da retração com 28 dias de secagem e com 3 meses de secagem na combinação 50%RCA vs 25%RCA porém, esta diferença não se apresentou nas demais idades analisadas, indicando uma variação pontual.

A Análise 3 tem por objetivo avaliar a influência da substituição do agregado natural por reciclado de tijolo na magnitude da retração. Assim, conforme pode ser observado na Tabela 42, não foi identificado variações significativas até 7 dias de secagem. Porém, com 14 dias de secagem foi possível identificar através das combinações 100%RMA vs 25%RMA e 100%RMA vs 50%RMA, indicando um comportamento diferenciado do concreto com 100% de RMA frente a esses dois materiais. Apesar da combinação 100%RMA vs C40-M2 se encontrar dentro do intervalo de confiança, esta apresentou valor de probabilidade próximo ao limite do intervalo.

É possível observar nas análises realizadas com 28 dias e 16 semanas de secagem, que houve variações significativas nas combinações 100%RMA vs C40-M2, 100%RMA vs 25%RMA, 100%RMA vs 50%RMA, 100%RMA vs 75%RMA, 75%RMA vs 25%RMA, 75%RMA vs C40-M2. Tal fato indica que o concreto com 100% e 75% de RMA passaram a apresentar comportamento diferenciado ao comportamento apresentado pelo concreto de referência e os concretos com 25% e 50% de RMA.

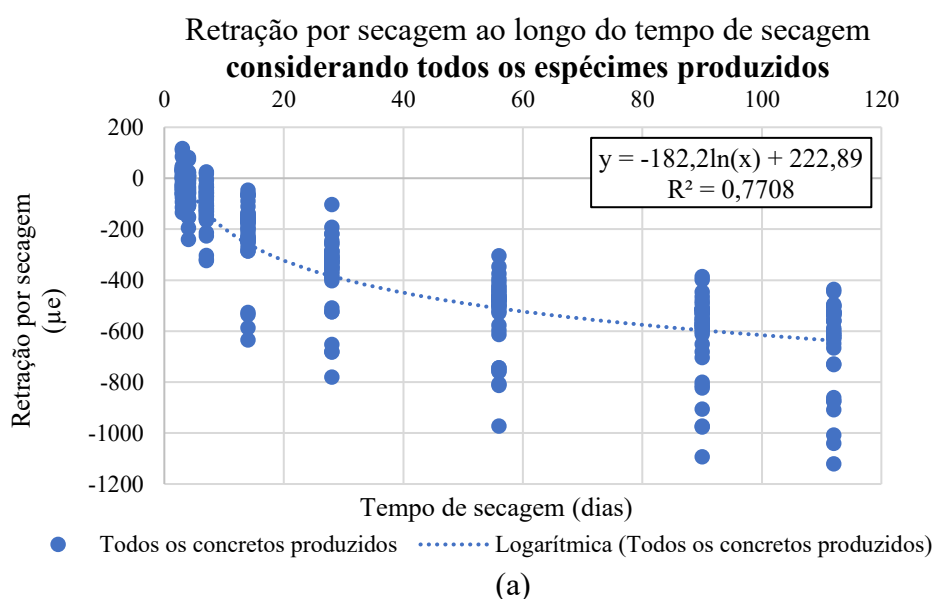
Desta forma, constatar que até esta idade, a substituição do agregado natural por RMA em até 50% não influenciou significativamente na retração do concreto. Porém, com substituições superiores a 50%, foi possível constatar que o agregado alterou significativamente o comportamento do concreto frente a retração.

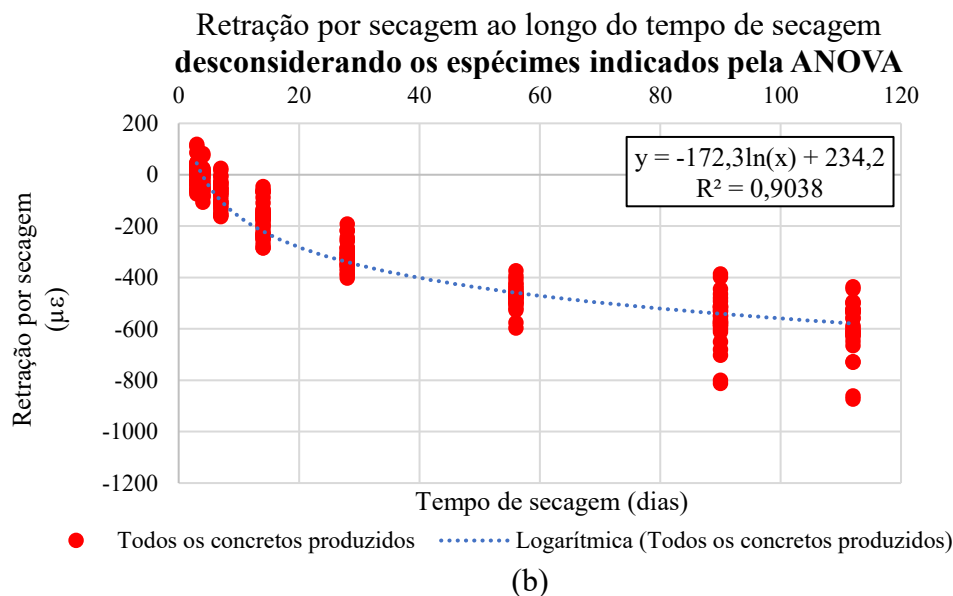
A Análise 4 tem por objetivo identificar um grupo de concretos dentro dos concretos produzidos que apresentem comportamento semelhante. Por meio de regressões lineares, realizadas no MATLAB, será determinada a equação que melhor represente o comportamento deste grupo. Esta equação será utilizada na análise de fissuração através da formulação proposta por Gilbert e Nejadi (2004).

Por meio da Análise 4, foi possível identificar que com 3 dias de secagem o concreto C60-ARI apresentou valores de retração significativamente diferente da variância dos demais concretos analisados. Com 4 e 7 dias de secagem, o concreto C60-ARI e C60-CP2 apresentaram comportamento diferente dos demais e semelhantes entre si. Com 14 dias de secagem, o concreto C60-CP2 apresentou comportamento diferenciado dos demais. Com 28 e 56 dias de secagem, o concreto C60-CP2 e 100%RMA apresentaram comportamento diferenciado dos demais concretos. Já com 3 meses de secagem e com 16 semanas de secagem, o concreto C60-ARI e C60-CP2 apresentaram comportamento diferente dos demais.

No Gráfico 32 (a) encontram-se todos os pontos avaliados pela Análise 4 e, é possível verificar que ao adotar uma linha de tendência logarítmica, o coeficiente de ajuste R^2 da regressão linear foi de 0,7708.

Gráfico 32 – (a) Todos dados de retração por secagem (b) Dados de retração por secagem após o primeiro tratamento dos dados.





Diante da identificação dos concretos que apresentaram baixa correlação, através da Análise 4, estes concretos foram retirados da avaliação e, novamente foi determinada a linha de tendência logarítmica desse conjunto de dados e, para este novo conjunto de dados, o coeficiente de ajuste R^2 foi de 0,9038. O aumento no coeficiente R^2 indica que a retirada do grupo de concretos apontado pela Análise 4 resultou em melhora na correlação entre a linha de tendência e os valores obtidos experimentalmente da retração e tal fato pode ser observado no Gráfico 32 (b).

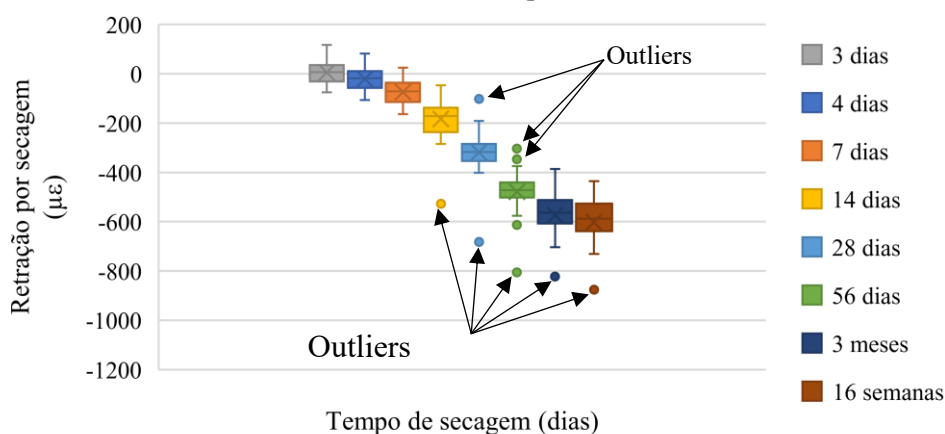
Contudo, apesar da melhora na dispersão dos valores de retração, é possível observar no Gráfico 32 (b) a existência de dispersão entre os pontos. Para avaliar se estes pontos são ou não outliers, foram confeccionados os diagramas de caixa (Boxplot) apresentados no Gráfico 33 (a), (b) e (c). No diagrama de caixas (Boxplot), os pontos que se encontram afastados mais do que 1,5 do interquartil do primeiro quartil ou do terceiro quartil são considerados outliers, Montgomery (2018).

Assim, conforme pode ser observado no Gráfico 33 (a), foram identificados os outlier do conjunto de dados e estes foram retirados da análise. Posteriormente, de posse do novo conjunto de dados, novamente foi confeccionado o Boxplot desses dados e, novamente foram identificados os outlier desse novo conjunto de dados, conforme pode ser observado no Gráfico 33 (b).

Através da identificação dos outliers apresentados no Gráfico 33 (b), estes outliers também foram retirados da análise, resultando um grupo de dados não apresenta outliers, conforme pode ser observado no Gráfico 33 (b).

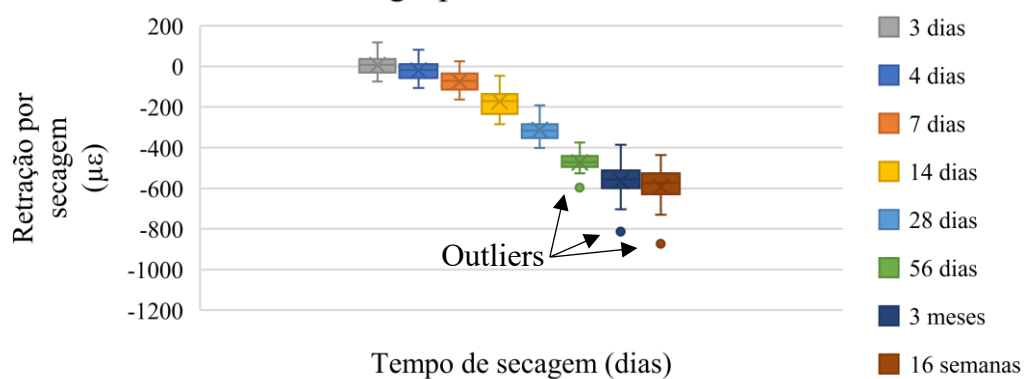
Gráfico 33 – Boxplot dos valores de retração obtidos (a) após a retirada dos concretos não similares, (b) após a retirada do primeiro grupo de outliers e (c) ao final do processo de retirada de Outliers.

Boxplot dos valores obtidos após a retirada dos concretos que não se mostraram similares pela ANOVA



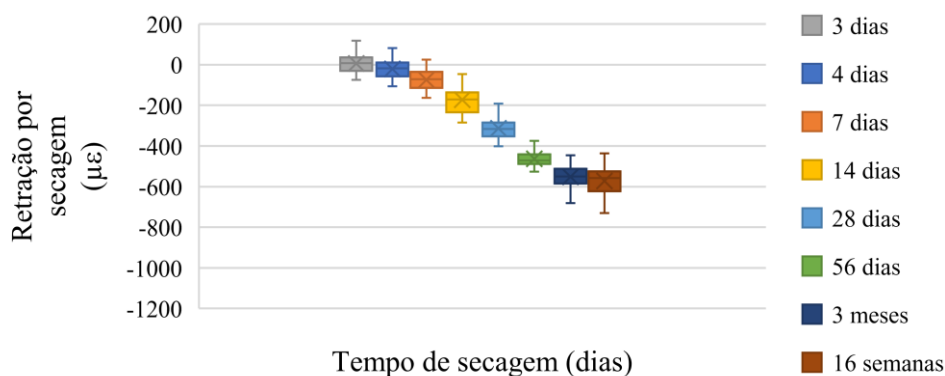
(a)

Boxplot dos valores obtidos a partir da exclusão do primeiro grupo de Outliers



(b)

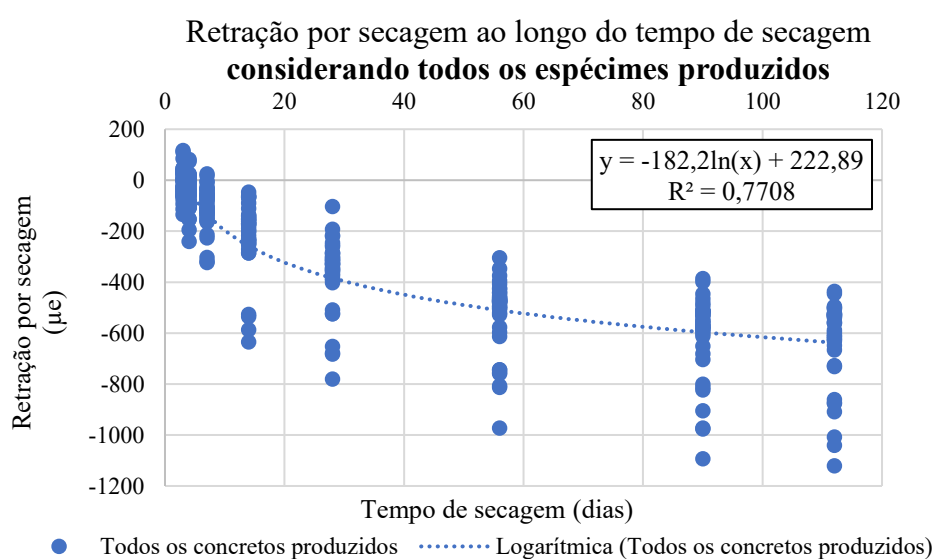
Boxplot dos valores obtidos ao final do processo de retirada de Outliers



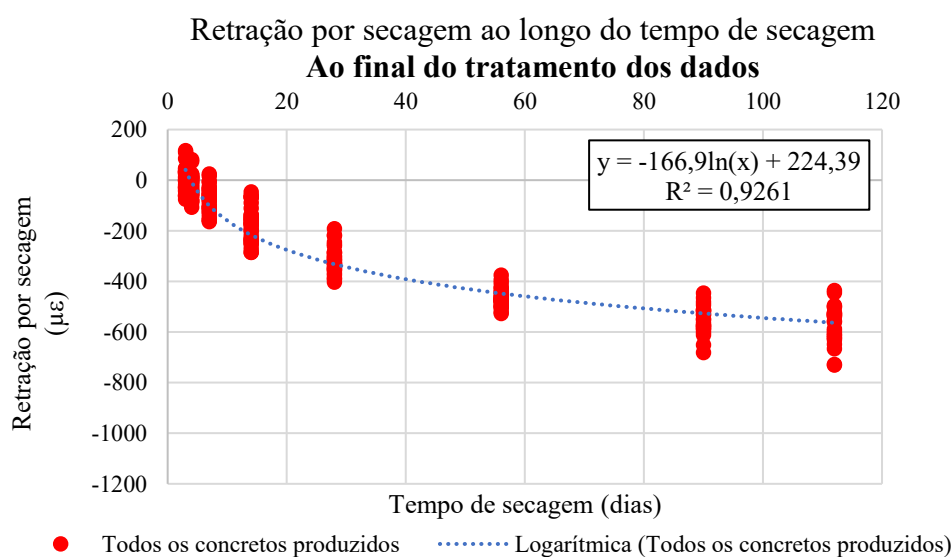
(c)

De posse dos valores tratados, foi possível traçar uma nova linha de tendência no Excel e esta linha de tendência apresentou um coeficiente R^2 de 0,9261, que ao ser comparado com o valor de R^2 de 0,7708 apresentado inicialmente, indica que o processo de retirada de concretos não similares e a retirada dos Outliers resultou melhora no grupo de dados, conforme pode ser constatado no Gráfico 34.

Gráfico 34 – Retração por secagem (a) com todos os valores obtidos experimentalmente e (b) ao final do tratamento estatístico dos dados.



(a)



(b)

De posse dos dados tratados da retração por secagem, estes dados foram utilizados para a determinação de uma equação através de regressões lineares através do MATLAB. Assim, o modelo que apresentou melhor conformidade ao comportamento apresentado pela retração foi modelo de Power com dois termos, Equação 75.

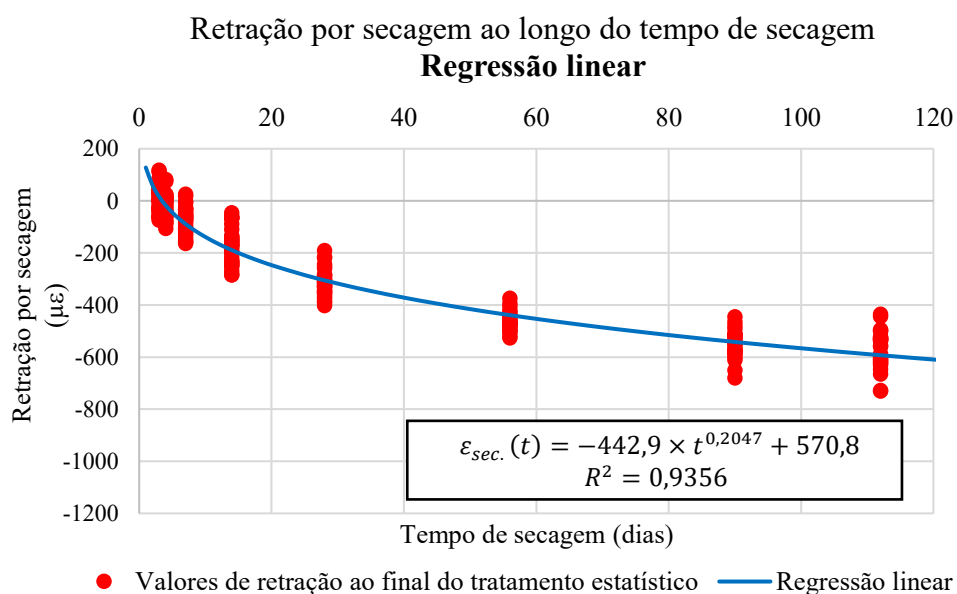
$$\varepsilon_{sec.}(t) = -442,9 \cdot t^{0,2047} + 570,8 \quad (75)$$

Na qual:

$\varepsilon_{sec.}(t)$ – Valor da retração por secagem ($\mu\varepsilon$)
 t – Tempo de secagem (dias)

Esta equação apresentou um coeficiente de ajuste R^2 de 0,9356, superior a equação obtida pela linha de tendência logarítmica produzida pelo Excel.

Gráfico 35 – Gráfico da regressão linear



5.4. Regressão linear da retração autógena dos concretos produzidos

Devido as oscilações de leituras da retração autógena encontradas, optou-se em realizar regressões lineares a fim de homogeneizar os valores encontrados e em decorrência da brusca variação sistêmica apresentada em todas as leituras da retração autógena dos espécimes entre o dia 20/05/2019 e 27/05/2019, os valores a partir do dia 20/05/2019 foram retirados da análise.

Diante das medidas adotadas, foi utilizado o MATLAB para determinar equações que melhor representam o comportamento da retração autógena dos concretos produzidos. Assim, Equação 72 a seguir, representa o modelo da equação encontrada para cada um dos concretos ensaiados e, os seus coeficientes encontram-se dispostos na Tabela 43.

$$\varepsilon_{aut.}(t_i) = a \times t_i^b + c \quad (76)$$

Na qual:

- $\varepsilon_{aut.}(t_i)$ – Valor da retração autógena após t dias do início do processo de hidratação do cimento, em $\mu\epsilon$.
- t_i – Tempo de início do processo de hidratação do cimento, em dias.

Tabela 43 – Coeficientes da equação autógena obtida através de regressões lineares para cada um dos concretos produzidos.

Coeficientes da Equação 76 para cada um dos concretos avaliados				
Concreto	a	b	c	R ²
C40-M1	-2,857	0,7658	0,8562	0,8635
C40-M2	-42,89	0,2596	27,16	0,903
25%RCA	-50,44	0,2389	35,61	0,8602
50%RCA	-76,03	0,1946	55,66	0,814
75%RCA	-11,29	0,5361	-9,514	0,7526
100%RCA	-27,04	0,4242	7,947	0,8762
25%RMA	-21,02	0,2432	0	0,1076
50%RMA	68,94	-1,134	-68,47	0,5918
75%RMA	345,7	-0,0283	-345,8	0,5238
100%RMA	-17,59	0,2698	0	0,4199

Na Tabela 43 é possível constatar que os concretos produzidos com agregado reciclado de tijolo conduziram a equações com baixa aderência, tal fato pode ser justificado devido a variabilidade do resultado obtido experimental entre os CP produzidos.

É possível observar no Gráfico 36, Gráfico 37 e Gráfico 38 todos valores de retração autógena obtidos experimentalmente dispersos entorno das suas respectivas regressões lineares.

Para melhorar o ajuste das equações com os valores obtidos experimentalmente, os pontos que se encontraram fora do intervalo de confiança de 95% foram retirados da análise.

Gráfico 36 – Regressões lineares obtidas para o (a) concreto C40-M1, (b) concreto C40-M2.

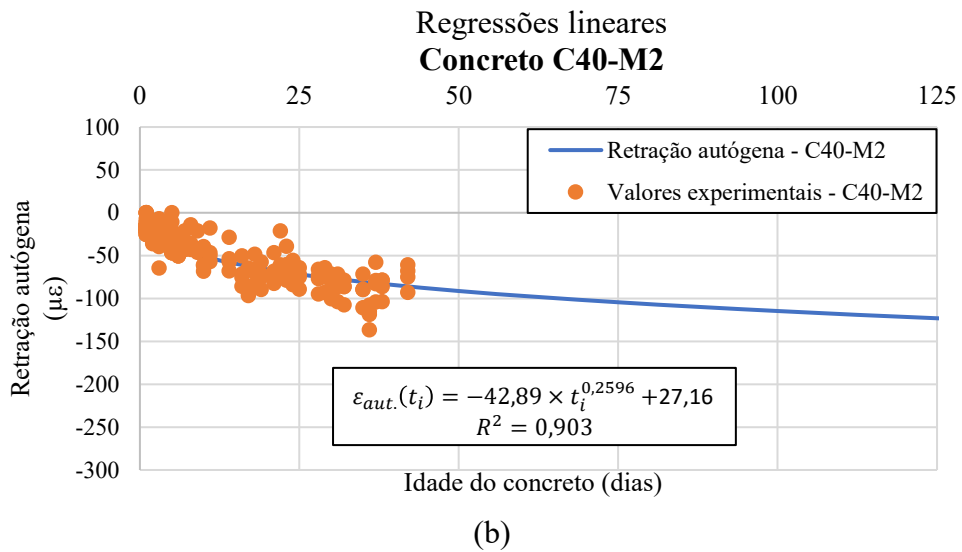
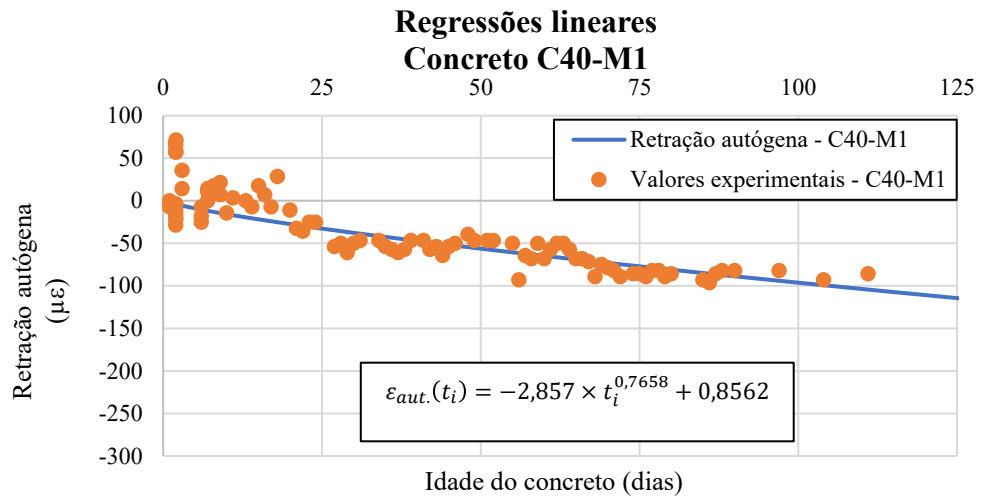
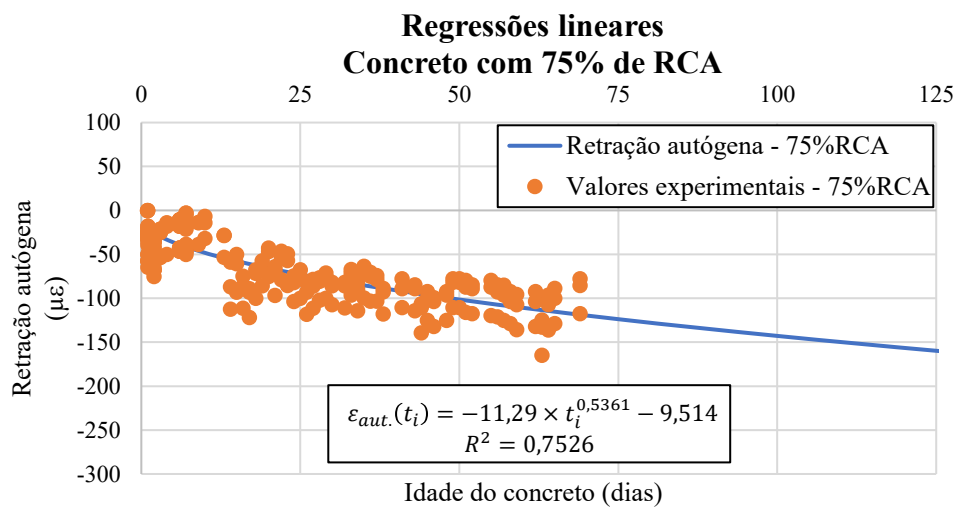
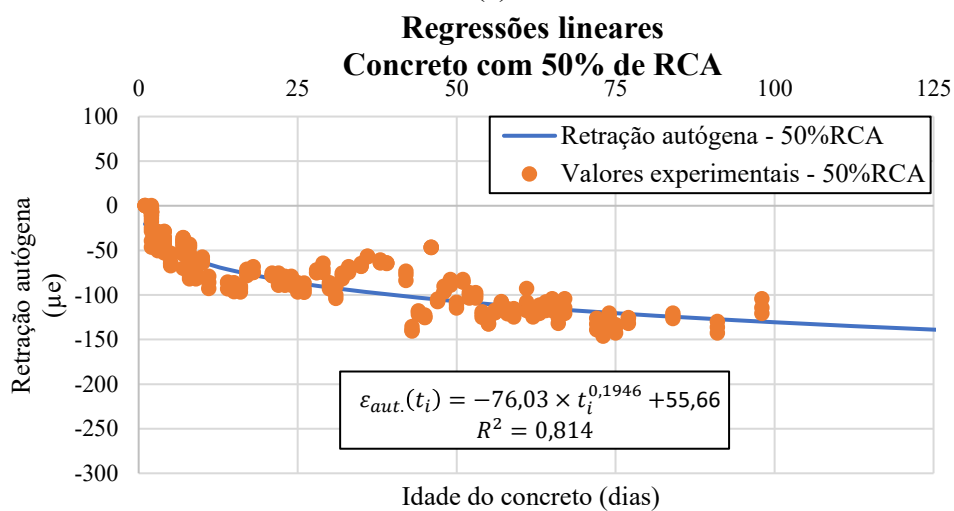
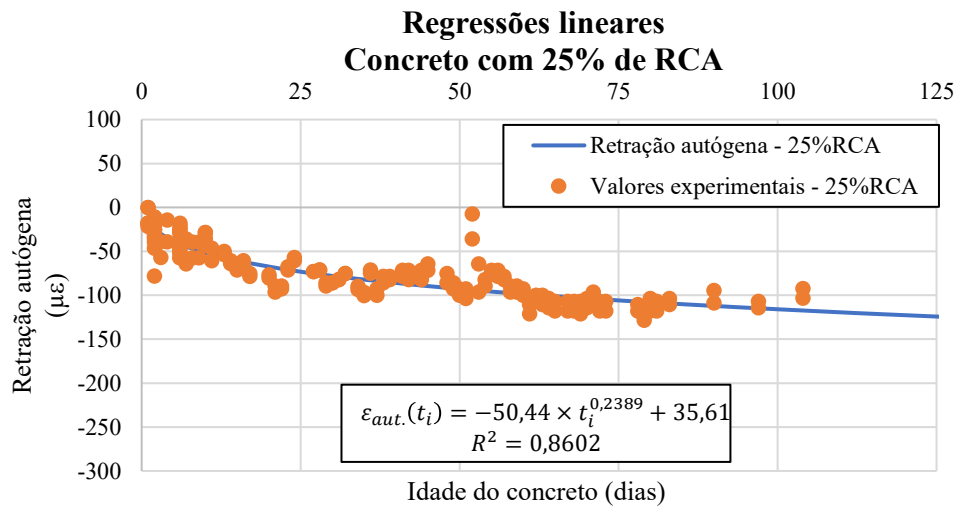


Gráfico 37 – Regressões lineares obtidas para o (a) concreto 25%RCA, (b) concreto 50%RCA, (c) 75%RCA e (d) 100%RCA.



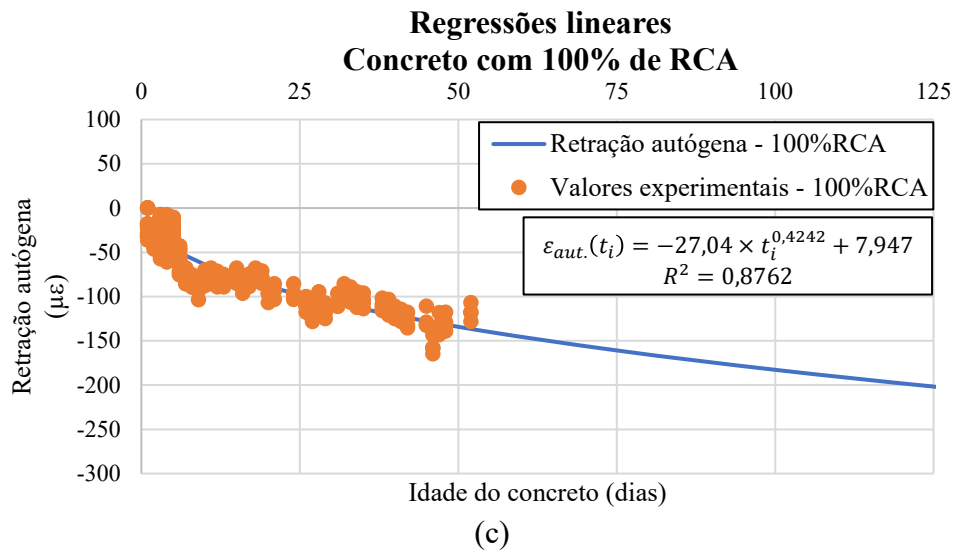
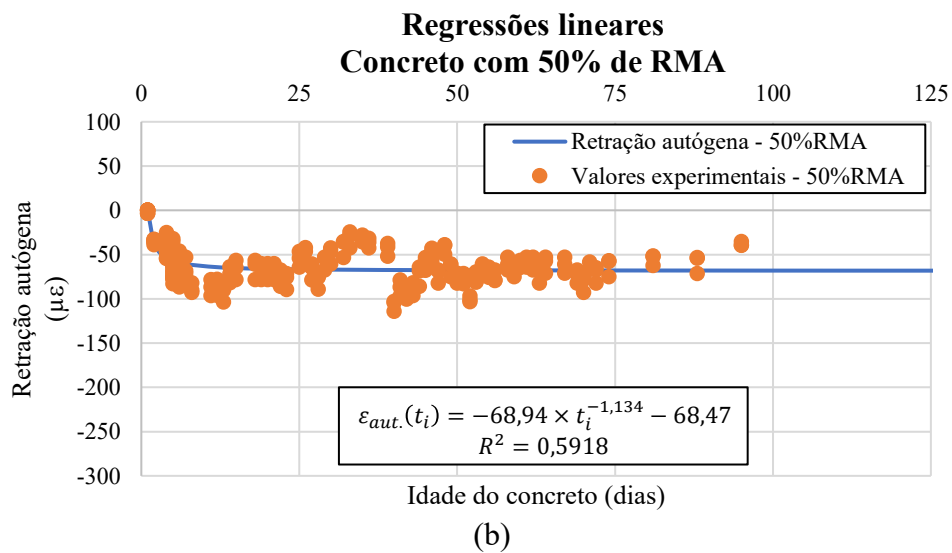
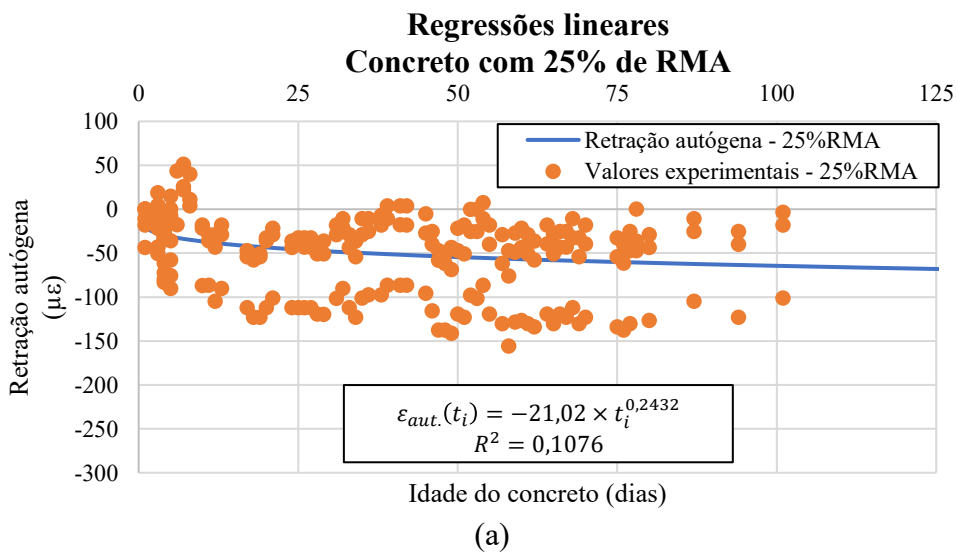
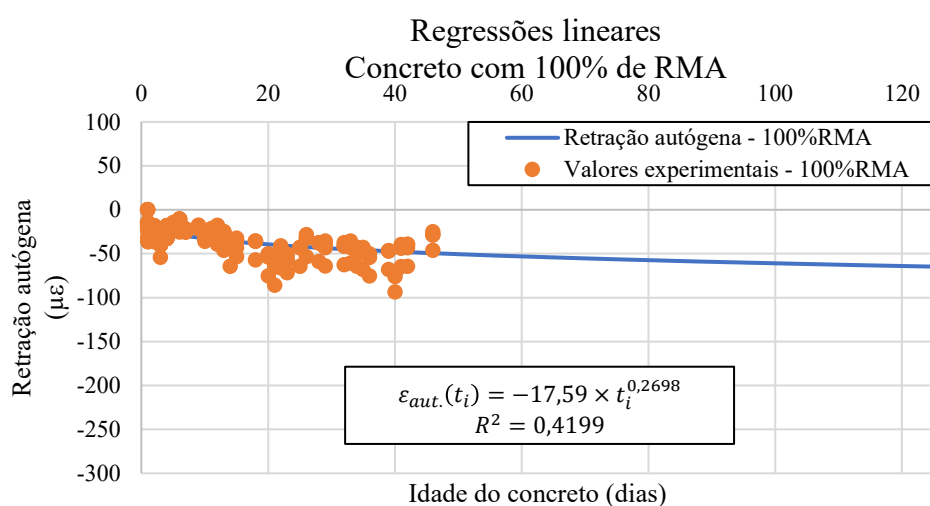
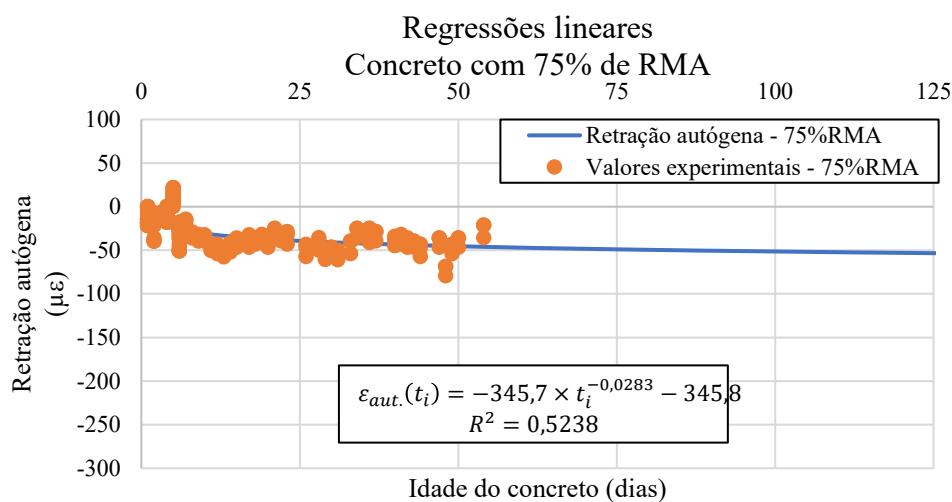


Gráfico 38 – Regressões lineares obtidas para o (a) concreto 25%RCA, (b) concreto 50%RCA, (c) 75%RCA e (d) 100%RCA.





Como a disponibilidade de valores experimentais raramente superam o tempo de 100 dias do início do processo de hidratação, as equações apresentadas apresentam validade para o intervalo de tempo dentro do período avaliado, a extrapolação para idades superiores pode conduzir a valores exagerados da retração autóloga.

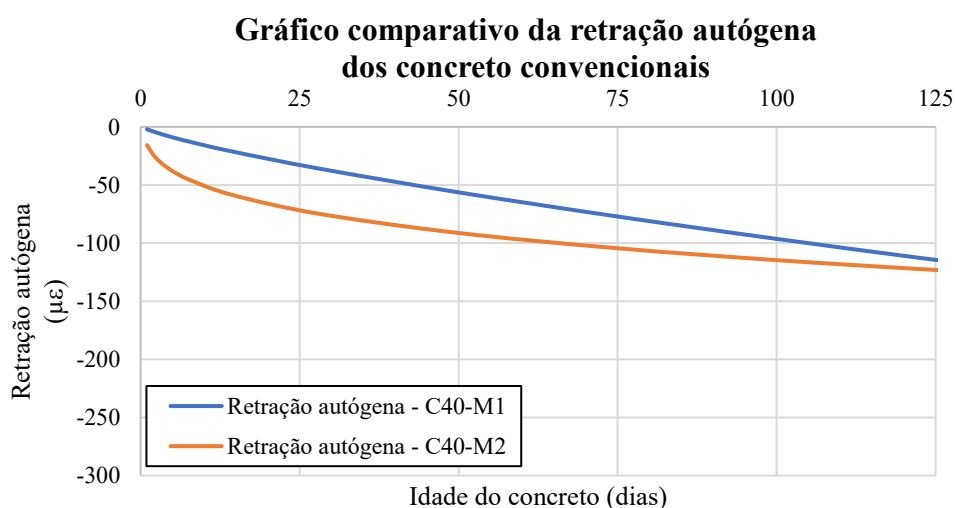
Ao comparar os gráficos equação da retração autóloga do concreto C40-M1, com a/c de 0,35, com o gráfico do concreto C40-M2, a/c de 0,38, é possível observar no Gráfico 39 (a) que, inicialmente os concretos com fator água cimento mais baixos apresentam menores valores de retração autóloga mas em idades mais avançadas estes apresentaram valores superiores ao encontrado nos concretos com maior quantidade de água.

Ao comparar o concreto C40-M2 (referência) com os concretos produzidos com substituição do agregado natural por agregado reciclado é possível observar no Gráfico 39 (b) que para a substituição de 25% do NA por RCA, o comportamento da retração entre os

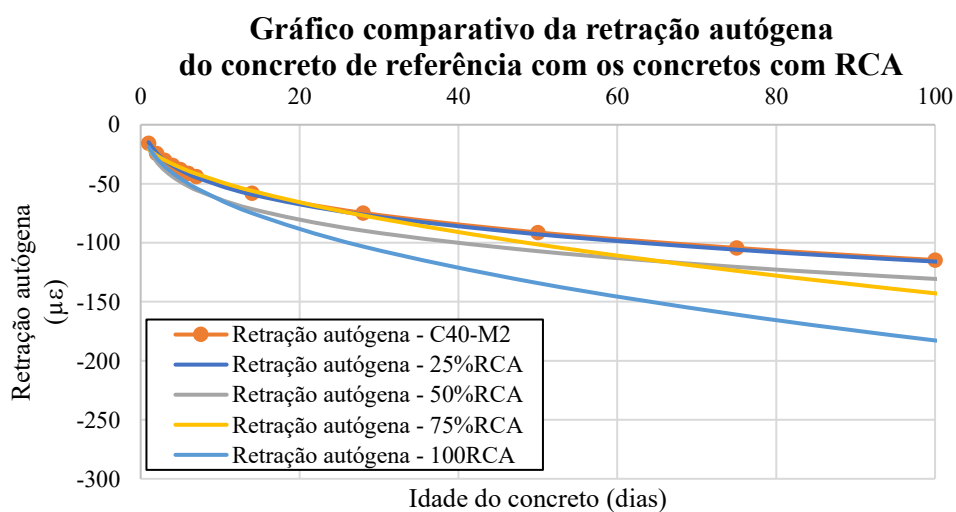
concretos foi similar mas, na medida em que se aumenta o teor de RCA, a magnitude da retração também aumenta.

Ao comparar o concreto C40-M2 com os concretos produzidos com RMA, é possível observar no Gráfico 39 (c) que a retração encontrada no concreto de referência é superior do que ao encontrado nos concretos com RMA, indicando que a substituição do agregado natural por reciclado de tijolo melhora o comportamento da retração autóloga. Também é possível observar que os concretos com RMA apresentaram um comportamento similar.

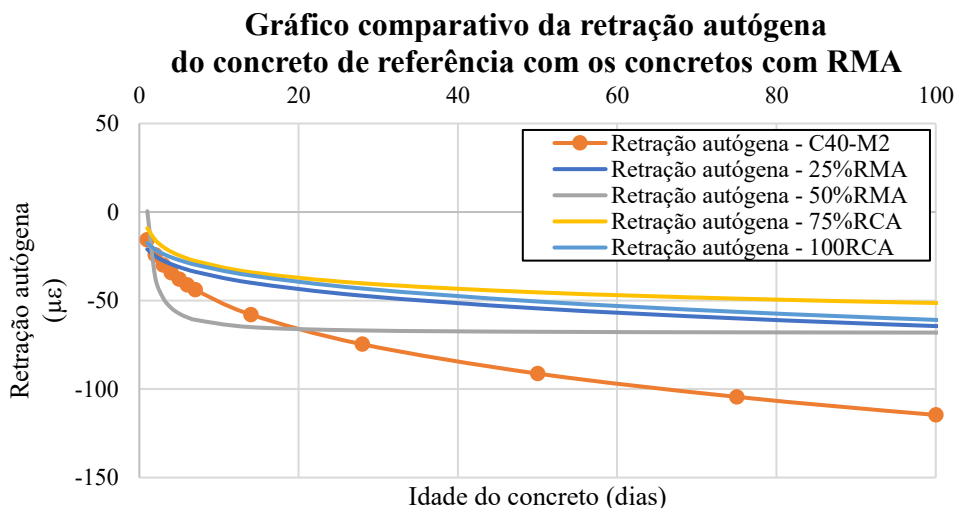
Gráfico 39 – Gráfico comparativo da retração autóloga (a) dos concretos convencionais, (b) do concreto de referência com os concretos produzidos com RCA e (c) do concreto de referência com os concretos produzidos com RMA.



(a)



(b)



(c)

5.5. Análise da fissuração dos concretos

De posse dos valores de retração obtidos experimentalmente, da equação proposta para a determinação da retração por secagem no Item 5.3, das equações para a determinação da retração autóloga Item 5.4 e das propriedades mecânicas dos concretos produzidos neste trabalho, estes parâmetros serão utilizadas para determinar a abertura de fissuras em um trecho de laje de $5,0 \times 1,0$ metros de comprimento com 15 cm de espessura, adotando uma armadura com o diâmetro de 10,0mm de aço CA-50 nervurado este podendo apresentar espaçamento de 150mm, 100mm, 75mm e 50mm. Os dados referentes às armaduras adotadas na análise estão apresentados na Tabela 44 e Tabela 45.

Tabela 44 – Área de aço das armaduras utilizadas na análise de fissuração

Armadura utilizada na análise de fissuração					
Diâmetro (mm)	AS 1 Barra (mm ²)	Área de aço, em mm ² , para o espaçamento entre as barras de:			
		150 mm	100 mm	75 mm	50 mm
10,00	78,54	471,2	706,9	863,9	1256,6

Tabela 45 – Taxa de armadura das armaduras utilizadas na análise de fissuração

Taxa de armadura utilizada na análise de fissuração					
Diâmetro (mm)	AS 1 Barra (mm ²)	Taxa de armadura para o espaçamento entre as barras de:			
		ρ 150 mm	ρ 100 mm	ρ 75 mm	ρ 50 mm
10,00	78,54	0,00315	0,00473	0,00579	0,00845

Serão utilizados os valores de retração obtidos experimentalmente para as idades de leitura de 118 dias e 140 dias e serão utilizados os valores de para as idades de 100, 150 e 500. A retração total foi obtida conforme a Equação 77 e o resumo das propriedades mecânicas utilizadas e da retração podem ser encontrados na Tabela 46.

Para a retração autógena, serão consideradas a equação da retração por secagem indicada no Item 5.3 e a equação da retração autógena indicada no Item 5.4, sendo que para a retração autógena, será considerada a idade do concreto (t_i) variando de 1 dia até 100 dias e, após esta idade os valores da retração autógena serão considerados constantes e iguais aos valores aos obtidos aos 100 dias.

$$\varepsilon_{tot.} = \varepsilon_{sec.}(t) + \varepsilon_{aut.}(t_i) \quad (77)$$

Tabela 46 – Tabela resumo das propriedades dos concretos utilizados no cálculo da fissuração.

Concreto	Propriedades mecânicas				Valores da retração total ($\mu\varepsilon$)				
	f_{ek} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	φ^*	100 ⁽¹⁾ ($\mu\varepsilon$)	118 ⁽²⁾ ($\mu\varepsilon$)	140 ⁽²⁾ ($\mu\varepsilon$)	150 ⁽¹⁾ ($\mu\varepsilon$)	500 ⁽¹⁾ ($\mu\varepsilon$)
C40-M1	45,24	3,25	26,39	1,53	-662,4	-614,9	-623,2	-760,7	-1106,0
C40-M2	37,11	3,52	32,02	1,57	-680,7	-570,3	-615,4	-779,0	-1124,3
25%RCA	38,33	3,42	31,63	1,53	-682,0	-538,7	-568,7	-780,4	-1125,6
50%RCA	36,83	3,49	31,77	3,17	-696,7	-710,3	-738,7	-795,1	-1140,3
75%RCA	43,52	3,2	30,35	1,65	-708,9	-660,5	-667,6	-807,3	-1152,5
100%RCA	44,09	4,14	31,91	1,65	-748,8	-645,8	-635,1	-847,2	-1192,4
25%RMA	36,06	3,26	28,99	1,53	-630,5	-577,3	-626,0	-728,9	-1074,1
50%RMA	30,94	2,87	27,82	1,86	-634,2	-663,9	-697,1	-732,5	-1077,8
75%RMA	23,08	2,55	22,5	1,69	-608,4	-716,7	-746,3	-706,8	-1052,0
100%RMA	23,45	2,19	21,02	1,69	-627,0	-858,5	-916,6	-725,4	-1070,6

⁽¹⁾ Retração determinada através das regressões lineares;

⁽²⁾ Retração determinada com os valores obtidos experimentalmente.

O coeficiente de fluência apresentado na Tabela 46 foi determinado através da formulação indicada pelo ACI 209.2R (2008) e o cálculo deste coeficiente pode ser encontrado no ANEXO A.

Utilizando as propriedades mecânicas dos concretos e as regressões lineares obtidas, foi possível determinar a idade de surgimento da primeira fissura através da Equação 9, de modo que na Tabela 47 encontram-se apresentadas as idades de formação da primeira fissura proveniente da retração.

Tabela 47 – Idade do surgimento da primeira fissura nas lajes

Concreto	Idade de surgimento da primeira fissura			Idade do surgimento da 1ª fissura (dias)
	f_t (MPa)	E_c (GPa)	$\epsilon_{c,t}$ ($\mu\epsilon$)	
C40-M1	3,25	26,39	-123,15	8,2
C40-M2	3,52	32,02	-109,93	6,0
25%RCA	3,42	31,63	-108,13	5,9
50%RCA	3,49	31,77	-109,85	5,6
75%RCA	3,2	30,35	-105,44	5,9
100%RCA	4,14	31,91	-129,74	6,5
25%RMA	3,26	28,99	-112,45	6,5
50%RMA	2,87	27,82	-103,16	5,0
75%RMA	2,55	22,5	-113,33	7,3
100%RMA	2,19	21,02	-104,19	6,3

É possível observar que ao comparar o concreto C40-M1 (a/c de 0,35) com o concreto C40-M2 (a/c de 0,38), o concreto com menor fator água/cimento apresentou a formação da primeira fissura dois dias após o concreto produzido com fator a/c de 0,38. Ambos os concretos apresentaram comportamento de retração semelhantes, mas, as propriedades mecânicas apresentadas pelo concreto C40-M1 fizeram com que este fosse capaz de resistir ao esforço imposto pela retração por mais tempo do que o concreto de referência.

Ao comparar o concreto de referência com os concretos produzidos com agregado graúdo de RCA, é possível verificar que os concretos produzidos com 25%, 50% e 75% de substituição do NA pelo agregado reciclado apresentaram fissuras de retração ligeiramente mais cedo do que o concreto de referência. Todavia, o concreto com 100% de substituição do agregado apresentou a primeira fissura mais tarde que os demais. Tal fato pode ser explicado em decorrência deste concreto ter apresentado uma resistência à tração 17,6% maior do que o concreto de referência e um módulo de elasticidade ligeiramente inferior (0,34%) quando

comparado com o concreto C40-M2, fazendo com que este concreto seja capaz de resistir ao esforço imposto pela retração por mais tempo que o concreto de referência.

Para o caso dos concretos produzidos com agregado de RMA, é possível verificar na Tabela 47 que o concreto com 25% de substituição apresentou idade de formação da primeira fissura superior a idade do concreto C40-M2. Tal fato pode ser explicado pela combinação da redução do módulo de elasticidade apresentado por este concreto e pela manifestação de retração com magnitude inferior a apresentada pelo concreto de referência, resultando na elevação da idade de formação da primeira fissura.

Apesar do concreto com 50% de RMA ter apresentado magnitude de retração inferior a magnitude apresentada pelo concreto de referência, este concreto apresentou resistência à tração 18,5% inferior a resistência apresentada pelo concreto de referência, o que implicou na formação da primeira fissura antes do que concreto C40-M2.

Já os concretos produzidos com 75% e 100% de substituição do NA pelo agregado de RMA apresentaram idade de formação da primeira fissura mais elevada que a idade apresentada pelo concreto de referência. Apesar desses concretos apresentarem retrações mais acentuadas quando comparadas com a retração do concreto de referência, estes concretos apresentaram redução significativa no módulo de elasticidade (29,7% e 34,4%), levando-os a resistirem por mais tempo ao esforço imposto pela retração antes da formação da primeira fissura.

Com base nas equações apresentadas no Item 1.3.1 foi realizada uma análise da abertura de fissuras nos concretos produzidos com o valor da retração obtida experimentalmente na idade de 118 dias. Esta análise tem por objetivo avaliar o comportamento desses concretos em um caso particular de modo a viabilizar a análise posterior da abertura de fissuras em todas as idades definidas.

Para a determinação da força provocada pela retração, $N(\infty)$, foi utilizada a Equação 12. Para a determinação da tensão na armadura na fissura, σ^*_{s2} , foi utilizada a Equação 22. Para determinar o espaçamento entre fissuras, s , foi utilizada a Equação 24. Para determinar a abertura da fissura, w , nos casos em que a armadura não escoou, utilizou-se a Equação 25 e, nos casos em que a armadura se apresentou escoamento, foi utilizada a Equação 28.

Tabela 48 – Fissuração da retração com 118 dias com taxa de armadura de 0,00315 e 0,00473.

Retração total aos 118 dias - Barra de aço CA-50 com 10,0 mm de diâmetro											
Concretos	$\varepsilon_{tot.}$ (me)	ρ de 0,00315					ρ de 0,00743				
		N(∞) (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)	N(∞) (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	614,9	410811	500	-	2	1,57	414114	500	-	4	1,38
C40-M2	570,3	394651	500	-	2	1,5	400915	500	-	4	1,38
25%RCA	538,7	371673	500	-	2	1,37	377315	500	-	4	1,26
50%RCA	710,3	416125	500	-	2	1,7	404793	500	-	4	1,37
75%RCA	660,5	307803	500	-	3	1,84	385910	500	-	5	1,68
100%RCA	645,8	427402	500	-	2	1,81	429544	500	-	4	1,67
25%RMA	577,3	394314	500	-	2	1,47	399401	500	-	4	1,31
50%RMA	663,9	301443	500	-	3	1,73	302942	429	833,3	6	0,38
75%RMA	716,7	326438	500	-	3	1,82	272306	385	714,3	7	0,36
100%RMA	858,5	231925	492	1000	5	0,66	227967	323	500	10	0,33

Tabela 49 – Fissuração da retração com 118 dias com taxa de armadura de 0,00315 e 0,00473.

Retração total aos 118 dias - Barra de aço CA-50 com 10,0 mm de diâmetro											
Concretos	$\varepsilon_{tot.}$ (me)	ρ de 0,00579					ρ de 0,00845				
		N(∞) (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)	N(∞) (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	614,9	384911	446	833,3	6	0,31	359460	286	416,7	12	0,16
C40-M2	570,3	460017	500	-	5	1,24	434775	346	500	10	0,17
25%RCA	538,7	432675	500	-	5	1,12	408352	325	500	10	0,16
50%RCA	710,3	452842	500	-	5	1,11	408543	325	500	10	0,17
75%RCA	660,5	390113	452	714,3	7	0,31	365036	290	357,1	14	0,16
100%RCA	645,8	489863	500	-	5	1,52	518387	413	555,6	9	0,2
25%RMA	577,3	371792	430	833,3	6	0,3	386536	308	454,5	11	0,16
50%RMA	663,9	322630	373	625	8	0,28	297085	236	312,5	16	0,14
75%RMA	716,7	265212	307	500	10	0,25	257195	205	263,2	19	0,13
100%RMA	858,5	202999	235	333,3	15	0,23	168037	134	166,7	30	0,12

Nas Tabela 48 e Tabela 49, é possível verificar que para a taxas de armadura de 0,00315 e 0,00473, os concretos com 118 dias de idade, segundo o modelo utilizado, irão apresentar aberturas de fissuras elevadas pois, na maioria dos casos a baixa taxa de armadura utilizada resultou em plastificação do aço utilizado.

Já para a taxa de armadura de 0,00579, é possível observar uma ligeira melhora no comportamento dos concretos que apresentaram resistência a tração inferior a 3,25 MPa, pois devido à baixa resistência relativa à tração conduziu a mais aberturas de fissuras e, conseqüentemente, numa melhor distribuição de tensões no aço utilizado. Entretanto, apesar

desses concretos terem apresentado melhora quanto a abertura de fissuras, é possível observar que o valor da abertura das fissuras foi superior ao valor máximo de 0,2mm permitido pela NBR 6118 (2014).

Ao diminuir o espaçamento entre barras para 50mm, é possível constatar que, para esta idade, todas as armaduras encontram-se fora do escoamento e, conseqüentemente, as fissuras apresentam aberturas inferiores ao limite indicado pela NBR 6118 (2014). Todavia, é possível verificar que, devido ao baixo módulo de elasticidade, a baixa resistência à tração e a elevada retração apresentada pelo concreto com 100% de RMA, este apresentou o maior número de fissuras quando comparado com os demais concretos.

Diante de isto, é possível encontrar no ANEXO B, as tabelas referentes as aberturas de fissuras apresentadas em cada uma das idades. Abaixo, será apresentado de forma sintetizada os valores obtidos de abertura de fissuras para cada uma das idades avaliadas na Tabela 50, Tabela 51, Tabela 52 e Tabela 53.

Tabela 50 – Tabela resumo da abertura de fissuras para as taxas de armadura de 0,00315 e 0,00473.

Concretos	Abertura de fissura, em milímetros, para ρ de 0,00315					Abertura de fissura, em milímetros, para ρ de 0,00473				
	100 ⁽¹⁾	118 ⁽²⁾	140 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	118 ⁽²⁾	140 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾
C40-M1	1,78	1,57	1,6	2,22	3,78	1,59	1,38	1,41	2,03	3,56
C40-M2	2	1,5	1,71	2,45	4,02	1,86	1,38	1,58	2,31	3,87
25%RCA	2,01	1,37	1,51	2,45	4,03	1,87	1,26	1,39	2,32	3,88
50%RCA	1,64	1,7	1,82	2,07	3,6	1,32	1,37	1,5	1,74	3,23
75%RCA	2,06	1,84	1,88	2,51	4,08	0,42	1,68	1,72	0,43	0,48
100%RCA	2,28	1,81	1,77	2,73	4,3	2,14	1,67	1,62	2,58	4,13
25%RMA	1,71	1,47	1,69	2,16	3,72	1,55	1,31	0,42	1,99	3,54
50%RMA	1,59	1,73	1,8	2,04	3,59	0,4	0,38	0,39	0,41	0,41
75%RMA	1,34	1,82	1,96	1,78	3,31	0,35	0,36	0,37	0,35	0,38
100%RMA	1,36	0,66	2,64	1,79	0,65	0,31	0,33	0,33	0,32	0,33

⁽¹⁾ Retração determinada através das regressões lineares

⁽²⁾ Retração determinada com os valores obtidos experimentalmente

Tabela 51 – Tabela resumo do número de fissuras para as taxas de armadura de 0,00315 e 0,00473.

Concretos	Número de fissuras formadas para ρ de 0,00315					Número de fissuras formadas para ρ de 0,00473				
	100 ⁽¹⁾	118 ⁽²⁾	140 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	118 ⁽²⁾	140 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾
C40-M1	3	2	2	3	5	5	4	4	6	9
C40-M2	3	2	2	3	4	5	4	4	6	9
25%RCA	3	2	2	3	5	5	4	4	6	9
50%RCA	2	2	2	3	4	4	4	4	5	8
75%RCA	3	3	3	3	5	6	5	5	7	10
100%RCA	2	2	2	3	4	4	4	4	5	8
25%RMA	3	2	2	3	5	5	4	5	6	9
50%RMA	3	3	3	3	5	5	6	6	6	11
75%RMA	3	3	4	3	5	5	7	7	7	11
100%RMA	3	5	5	4	7	7	10	11	8	14

⁽¹⁾ Retração determinada através das regressões lineares

⁽²⁾ Retração determinada com os valores obtidos experimentalmente

Tabela 52 – Tabela resumo da abertura de fissuras para as taxas de armadura de 0,00579 e 0,00845.

Concretos	Abertura de fissura, em milímetros, para ρ de 0,00579					Abertura de fissura, em milímetros, para ρ de 0,00845				
	100 ⁽¹⁾	118 ⁽²⁾	140 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	118 ⁽²⁾	140 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾
C40-M1	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17
C40-M2	0,33	1,24	0,33	0,34	0,36	0,18	0,17	0,17	0,18	0,18
25%RCA	0,33	1,12	0,31	0,32	0,34	0,17	0,16	0,16	0,17	0,17
50%RCA	1,05	1,11	0,32	0,33	0,35	0,18	0,17	0,18	0,18	0,19
75%RCA	0,31	0,31	0,31	0,33	0,33	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17
100%RCA	1,98	1,52	1,47	2,42	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,21
25%RMA	0,3	0,3	0,3	0,32	0,32	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
50%RMA	0,28	0,28	0,27	0,28	0,3	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15
75%RMA	0,26	0,25	0,26	0,26	0,27	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14
100%RMA	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

⁽¹⁾ Retração determinada através das regressões lineares

⁽²⁾ Retração determinada com os valores obtidos experimentalmente

Tabela 53 – Tabela resumo do número de fissuras para as taxas de armadura de 0,00579 e 0,00845.

Concretos	Número de fissuras formadas para ρ de 0,00579					Número de fissuras formadas para ρ de 0,00845				
	100 ⁽¹⁾	118 ⁽²⁾	140 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾	100 ⁽¹⁾	118 ⁽²⁾	140 ⁽²⁾	150 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾
C40-M1	7	6	6	8	14	13	12	12	16	28
C40-M2	7	5	6	8	13	13	10	12	16	27
25%RCA	7	5	6	9	14	14	10	11	17	28
50%RCA	5	5	6	7	12	10	10	11	13	23
75%RCA	8	7	7	9	15	16	14	14	19	30
100%RCA	6	5	5	7	12	12	9	9	15	23
25%RMA	7	6	7	8	14	13	11	13	16	28
50%RMA	7	8	9	9	15	14	16	17	18	31
75%RMA	7	10	10	9	16	14	19	20	19	33
100%RMA	10	15	16	12	20	19	30	33	24	41

⁽¹⁾ Retração determinada através das regressões lineares

⁽²⁾ Retração determinada com os valores obtidos experimentalmente

Diante das tabelas apresentadas, é possível verificar que quanto ao número de fissuras formadas ao longo do tempo de análise, não há diferença significativa entre o concreto C40-M1 e o concreto C40-M2. Ao analisar a abertura das fissuras-formadas, é possível observar que o concreto com maior fator água/cimento apresentou fissuras de maior abertura.

Ao comparar o concreto de referência com os concretos produzidos com RCA, é possível observar que estes concretos apresentaram um padrão de fissuração semelhante ao concreto de referência. Esta semelhança de comportamento não foi verificada nos concretos produzidos com substituição do NA por RMA.

Devido ao aumento do número de fissuras nos concretos com RMA, é possível verificar que as fissuras apresentadas pelo concreto com RMA apresentaram aberturas inferiores as aberturas apresentadas no concreto de referência. Tal fato se assemelha com o observado por Teixeira *et al.* (2016), que ao ensaiar lajes confeccionadas com RCD estes observaram que as lajes confeccionadas com RCD apresentaram mais fissuras que as lajes em concreto convencionais.

Através da análise realizada, é possível verificar que, para fins estruturais, a melhor taxa de armadura para combater a retração foi a taxa de 0,00845, pois foi a qual conduziu a aberturas de fissuras menores que o limite de 0,20mm indicado pelas normas.

CONCLUSÕES

Com base no apresentado nos itens anteriores, é possível concluir que adotando um adequado controle de qualidade no processo de obtenção do agregado reciclado e utilizando práticas as adequadas para confecção de concreto com substituição do agregado natural por RCA é possível obter concretos estruturais.

Com base no que foi apresentado no Item 4.1 pode-se concluir que a substituição do agregado natural por agregado reciclado não resultou em perda na resistência à compressão dos concretos produzidos e, pode-se observar que para o caso dos concretos produzidos com 75% e 100% de substituição, houve uma melhora na resistência à compressão aos 28 dias de 17,27% para o concreto com 75% de RCA e 18,81% para o concreto com 100% de RCA.

Para o caso da resistência à tração, os concretos com 25%, 50% e 75% de substituição apresentaram resistência à tração inferior a resistência apresentada pelo concreto de referência.

Quanto ao módulo de elasticidade, foi possível verificar no Item 4.1 que os concretos produzidos com RCA apresentaram valores de módulo de elasticidade semelhante ao módulo de elasticidade do concreto de referência.

Ao avaliar as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com substituição do agregado natural por agregados de RMA, pode-se concluir que a utilização deste tipo de agregado na produção dos concretos resultou, em todas as idades, em redução progressiva da resistência mecânica dos concretos produzidos. Tal fato também foi observado para as propriedades de resistência à tração e para o módulo de elasticidade.

Ao avaliar a retração autógena nas primeiras 24h de idade do concreto, foi possível verificar ao longo dos ensaios e das análises realizadas que, em média, os concretos produzidos com agregado reciclado de concreto tendem a apresentar valores de retração autógena próximos aos valores da retração autógena apresentada pelo concreto de referência. Já para o caso dos concretos confeccionados com RMA, foi possível verificar que ao longo deste trabalho os concretos produzidos com este tipo de agregado apresentaram uma retração autógena superior a retração autógena apresentada pelo concreto de referência.

Pode-se verificar ao longo desta pesquisa que a melhor forma para a determinação da retração autógena nas primeiras 24 horas foi por meio da utilização de Strain-gauge de imersão.

Na avaliação da retração autógena realizada após as primeiras 24 horas de idade, foi possível verificar que a retração manifestada pelos concretos de classe C40, o concreto com 0,35 de fator água/cimento foi inferior a retração manifesta pelo concreto com a/c de 0,38.

Ao avaliar a retração autógena dos os concretos produzidos com RCA após as primeiras 24h de idade com o concreto de referência, foi possível constatar que na medida em que se aumenta o teor de substituição a magnitude da retração autógena também aumenta e, tal fato é mais proeminente as idades superiores a 28 dias. Já para o caso dos concretos produzidos com agregado reciclado de tijolo, foi possível verificar que estes concretos apresentaram valores de retração autógena inferiores aos valores registrados no concreto de referência.

Ao avaliar a magnitude da retração por secagem, pode-se concluir que os concretos produzidos com RCA apresentaram retração com magnitude ligeiramente superior a magnitude apresentada pelo concreto de referência, não superando o valor de 19,8% para o concreto com 50% de substituição, conforme pode ser constatado na Tabela 35.

Todavia, ao analisar a retração por secagem obtidas nos concretos com RMA, é possível verificar que na medida em que houve o aumento no teor de substituição do agregado natural pelo reciclado o concreto produzido também apresentou aumento na magnitude da retração por secagem, podendo o concreto com 100% de RCA chegar a atingir uma retração de 67,44% superior a retração do concreto referência, conforme pode ser observado na Tabela 36.

Adicionalmente a isto, ao comparar a retração por secagem do concreto com RCA e o concreto produzido com RMA, foi possível constatar que os concretos produzidos com substituição do agregado natural por agregado de reciclado de tijolo apresentaram retração por secagem superior a retração do concreto com agregado reciclado de concreto, conforme pode ser observado na Tabela 37.

Na análise realizada no Item 5.3, foi possível verificar que o tipo de cimento e a classe de resistência do concreto influenciou diretamente na magnitude da retração por secagem. Pois ao comparar a retração por secagem encontrada no concreto de classe C60 produzido com cimento CP II com os concretos C40 também confeccionados com CP II, o concreto C60-CP II apresentou magnitudes superiores as magnitudes apresentadas pelos concretos C40.

Ao comparar a retração registrada nos concretos de classe de resistência C60, sendo um produzido com cimento CP2 e outro com cimento ARI, foi possível constatar através das análises realizadas que o tipo de cimento influenciou na magnitude da retração.

Quanto ao processo de fissuração, foi possível verificar que para os concretos produzidos com RCA que a primeira fissura apareceu mais cedo nos concretos com substituição do que no concreto de referência. Já para o caso do concreto com RMA, pode-se verificar que o concreto com 25%, 75% e 100% de substituição apresentaram fissuras mais tarde do que o concreto de referência.

Para os concretos sem substituição, pode-se constatar que o concreto com o menor fator água cimento apresentou a primeira fissura mais tardiamente que o concreto com fator água/cimento de 0,38.

Já ao final da análise do processo de fissuração, foi possível constatar que os concretos produzidos com RCA apresentaram uma fissuração semelhante a fissuração apresentada pelo concreto de referência. Tal fato associado as propriedades mecânicas apresentadas por estes concretos indicam viabilidade na utilização deste material em elementos estruturais.

Para o caso dos concretos produzidos com agregado reciclado de tijolo, foi possível verificar que este apresentou uma fissuração superior ao apresentado tanto pelo concreto de referência quanto o apresentado pelo concreto com RCA.

Estes concretos também apresentaram redução nas suas propriedades mecânicas. Tal fato faz com que, apesar da viabilidade apresentadas por este material, para utilização destes concretos é necessário seja haja um melhor controle deste material e que seja estipulado um teor limite de substituição para a utilização deste material em elementos estruturais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218: *Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis*. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: *Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7810: *Agregados em estado compactado seco – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: *Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9937: *Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 49: *Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 52: *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 131: *Concreto endurecido – Determinação da retração hidráulica ou higrométrica do concreto*. Rio de Janeiro, 1997.

ACI committee 209.2R, *Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008.

ACI committee 224, *Control of cracking of concretes structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001.

ACI committee 305, *Specification for hot weather concreting*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006.

ACI committee 318, *Building code requirements for structural concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014.

AMERICAN STANDARD TEST – ASTM C157, *Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete*, West Conshohocken, PA, 2017.

AGRELA, F., SÁNCHEZ DE JUAN, M. AYUSO, J. GERALDES, V. L., JIMÉNEZ, J. R. Limiting properties in the characterization of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials* 25, October 2011, pp. 3950-3955.

ALMEIDA, L. C., *Identificação de parâmetros estruturais com emprego de análise inversa*, Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2006

BALTHAR, V. K. C. B. L. M., Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BAZUCO, R. S., Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BUTTER, A. M., Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural, Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON, CEB- fip model code 2010: Design code, Comité Euro-International, Thomas Telford, London, UK, 2011.

BRITO, J., BARRA BIZINOTTO, M. e FERREIRA, L., *Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties*. Magazine of Concrete Research. 63. 617-627. 10.1680/mac.2011.63.8.617. 2011

DELLINGHAUSEN, L. M., *Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento portland branco e escória de alto forno*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2009.

DINIZ, J. Z. F, FERNANDES, J. F., KUPERMAN, S. C. Retração e Fluência – Concreto: Ciência e Tecnologia, Vlo.1, São Paulo, IBRACON, 2011.

EUROPEAN STANDARD, *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European committee for standardization, 2004.

FATHIFAZL, G., RAZAQPUR, A. G., ISGOR, O. B., ABBAS, A., FOUNIER, B., Creep and drying shrinkage characteristic of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate, Cement & Concrete Composites 33, 2011.

FORMAGINI, S., Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

GAYARRE, F. L, GONZÁLES, J. S., PÉREZ, C. L. C., LÓPEZ, M. A. S., ROS, P. S., MARTÍNEZ-BARRERA, G. Shrinkage and creep in structural concrete with recycled brick aggregates, *Construction and Buildings Materials*, vol. 228, 2019.

GILBERT, R.I. *Shrinkage cracking in fully restrained concrete members*, *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 2, March - April 1992, pags.141 - 149.

GILBERT, R.I. *Shrinkage, cracking and deflection-the Serviceability of Concrete Structures*, *Electronic Journal of Structural Engineering*, V. 1, 2001, pags.15 - 37.

GILBERT, R.I.; NEJADI, S. *Shrinkage cracking in fully restrained concrete members*, University of New South Wales, School of Civil Engineering, 2004.

KATAOKA, L. T., *Análise da deformabilidade por fluência e retração e sua utilização na monitoração de pilares de concreto*, Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

KIRCHHEIM, A. P.; POULON, V., *Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido - Concreto: Ciência e Tecnologia. Vol. 1*, São Paulo, IBRACOM, 2011.

LEITE, M. B, *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LNEC – E471: *Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*, Lisboa, Portugal, 2009.

LYE, C. Q., DHIR, R. K., GHATAORA, G. S., *Shrinkage of recycled aggregate concrete*, *Structures and Buildings*, vol. 169, 2016, pages 867-891.

MACEDO, B. N. T., Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras de aço para o uso em concreto armado, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTHEIRO, P. J. M., *Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais 2.ed*, São Paulo, IBRACOM, 2014.

MONTGOMERY, D. C., Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros, 6 ed. Rio de Janeiro, LCT, 2018.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J, *Tecnologia do concreto*, Porto Alegre, Bookman, 2013.

RODRIGUES, Púlio Penna Firme, *Estudo da correlação entre as reações de hidratação do cimento e a retração do concreto*, Tese de doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

ROMANO, Roberto Cesar de O.; CARDOSO, Fábio A.; PILEGGI, Rafael G., *Propriedades do Concreto no Estado Fresco - Concreto: Ciência e Tecnologia. Vol 1*, São Paulo, IBRACOM, 2011.

SENISSE, Juliana Alves de Lima, Influência do consumo de água, do teor de adição de micro fibras de polipropileno e do tipo de cimento no fenômeno de retração por secagem em concretos empregados em piso, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SILVA, R. V., BRITO, J, DHIR, R. K., Prediction of shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Buildings Materials*, vol. 77, 2015. Pag. 327-339.

SUZUKI, M., MEDDAH, M. S., SATO, R., Uses of porous ceramic waste aggregate for internal curing of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 39, issue 5, 2009, Pag. 373-381.

TAVARES, L. R. C., *Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

TEIXEIRA, P. J. B, TAVARES, M. E.N, LIMA, R. S. B., Estudo comparativo entre modelos de lajes utilizando concreto convencional e concreto com RCD, III Simpósio sobre sistemas sustentáveis, Porto alegre, 2016.

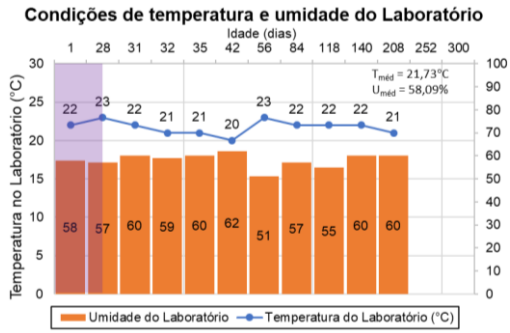
TRINDADE, J. C., A influência do teor de agregados reciclados provenientes de concretos simples com diferentes resistências no comportamento ao atrito-cisalhamento, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2017.

ZORDAN, S. E., A utilização de entulho como agregado na confecção do concreto, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1997.

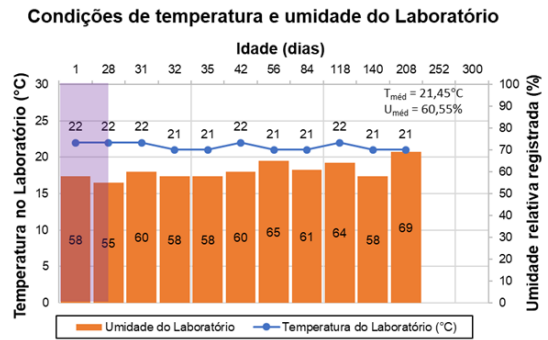
ANEXO A

Temperaturas e umidades registradas no laboratório

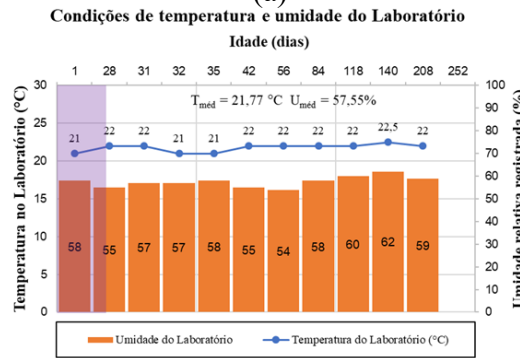
Gráfico 40 – (a) Concreto C60-ARI, (b) Concreto C60-CP2, (c) Concreto C40-M1, (d) Concreto C40-M2, (e) Concreto 25%RCA, (f) Concreto 50%RCA, (g) Concreto 75%RCA, (h) Concreto 100%RCA, (i) Concreto 25%RMA, (j) Concreto 50%RMA, (k) Concreto 75%RMA, (l) Concreto 100%RMA



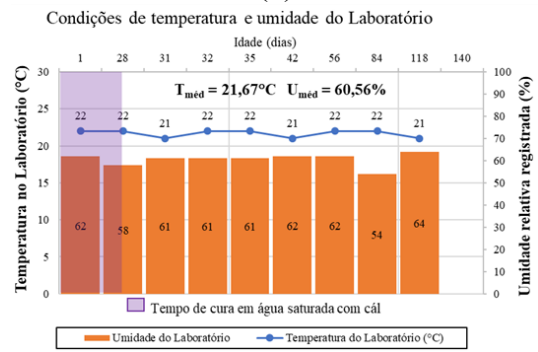
(a)



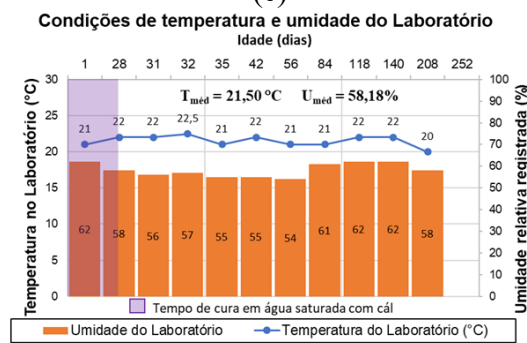
(b)



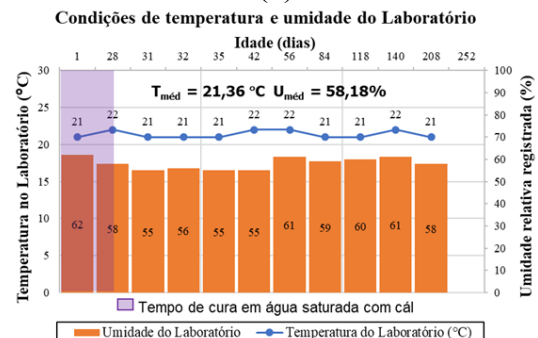
(c)



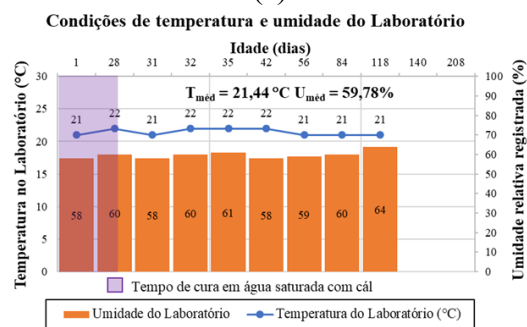
(d)



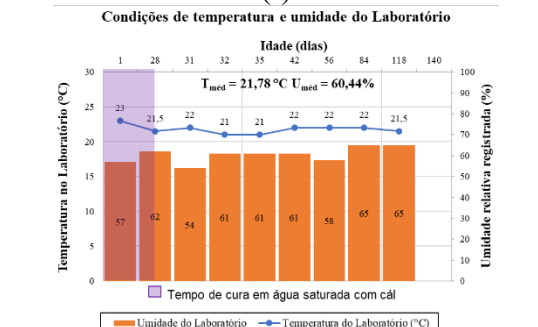
(e)



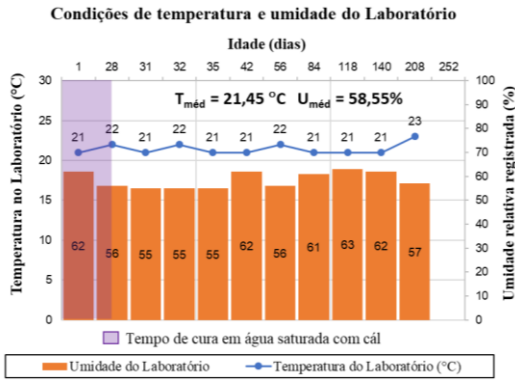
(f)



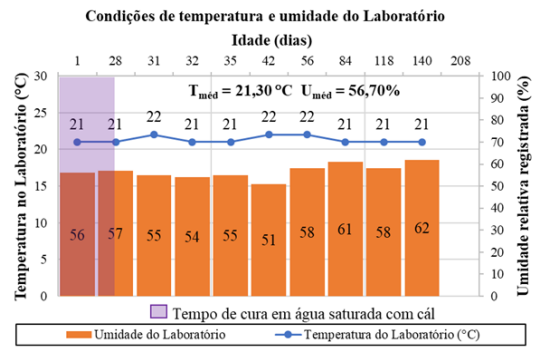
(g)



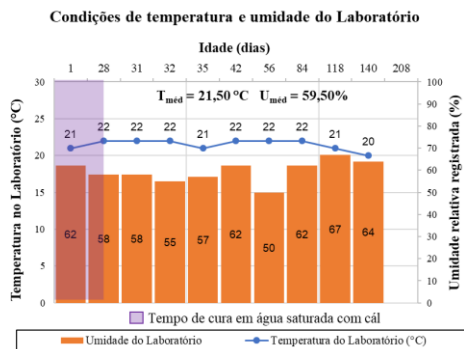
(h)



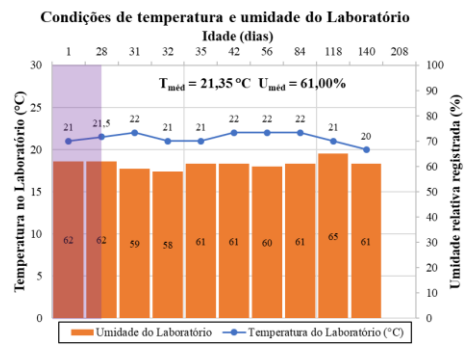
(i)



(j)



(k)



(l)

Gráficos dos resultados experimentos dos ensaios da retração autógena e da retração por secagem

Gráfico 41 – Retração por secagem nos CP do concreto C60-ARI

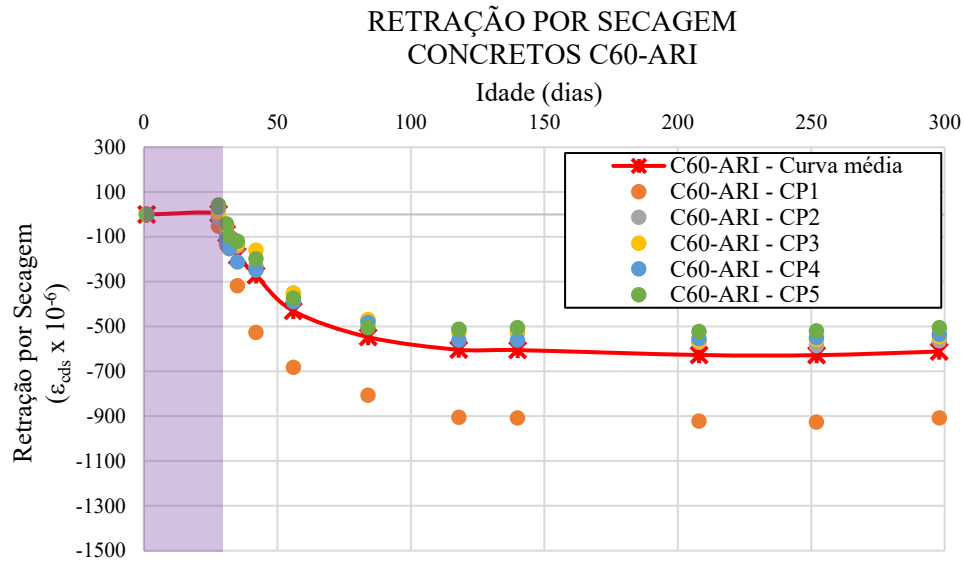


Gráfico 42 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto C60-ARI

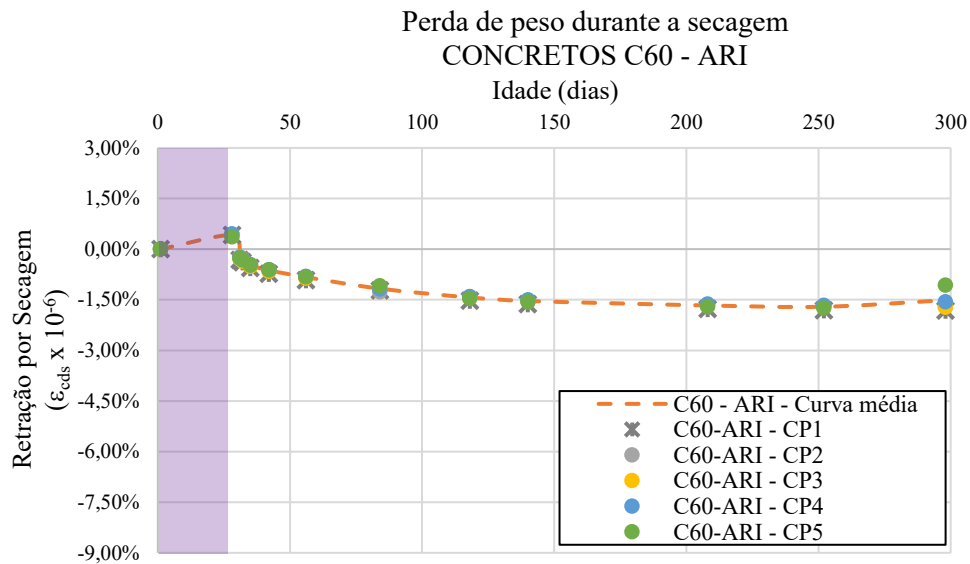


Gráfico 43 – Retração por secagem nos CP do concreto C60-CP2

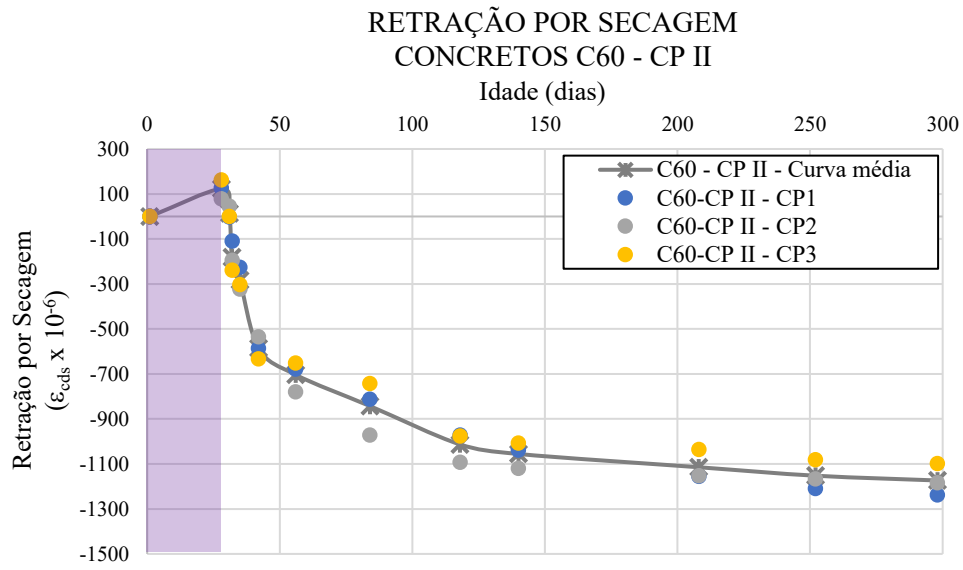


Gráfico 44 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto C60-CP II

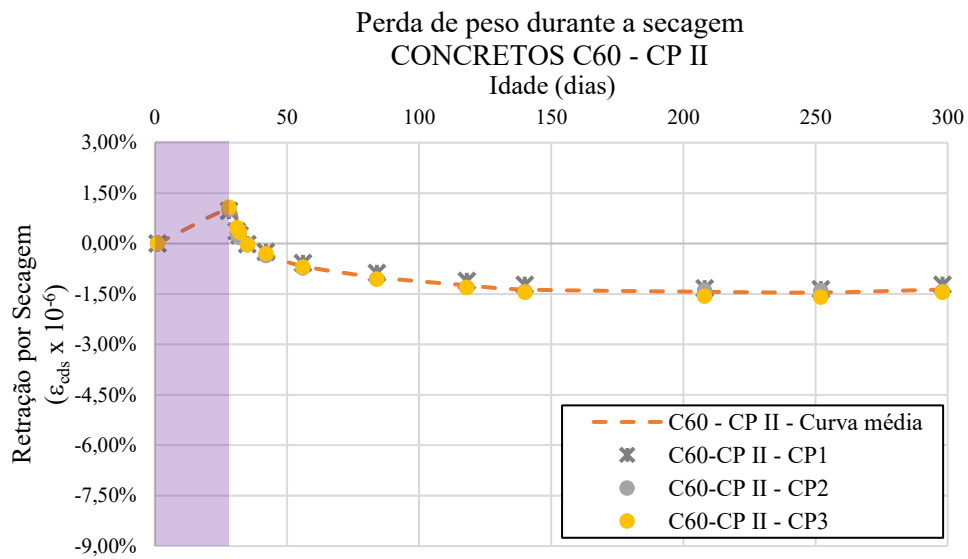


Gráfico 45 – Retração por secagem nos CP do concreto C40-M1

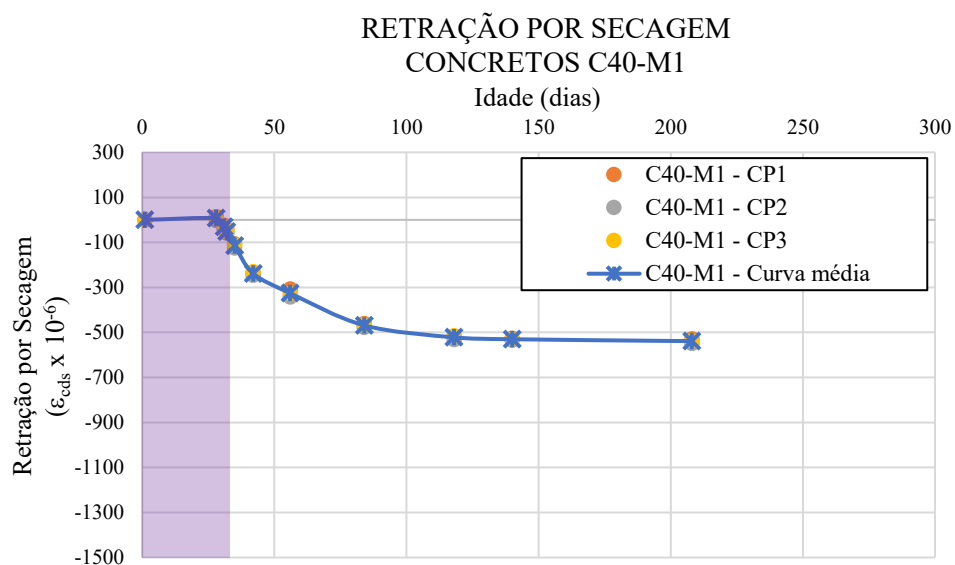


Gráfico 46 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto C40-M1

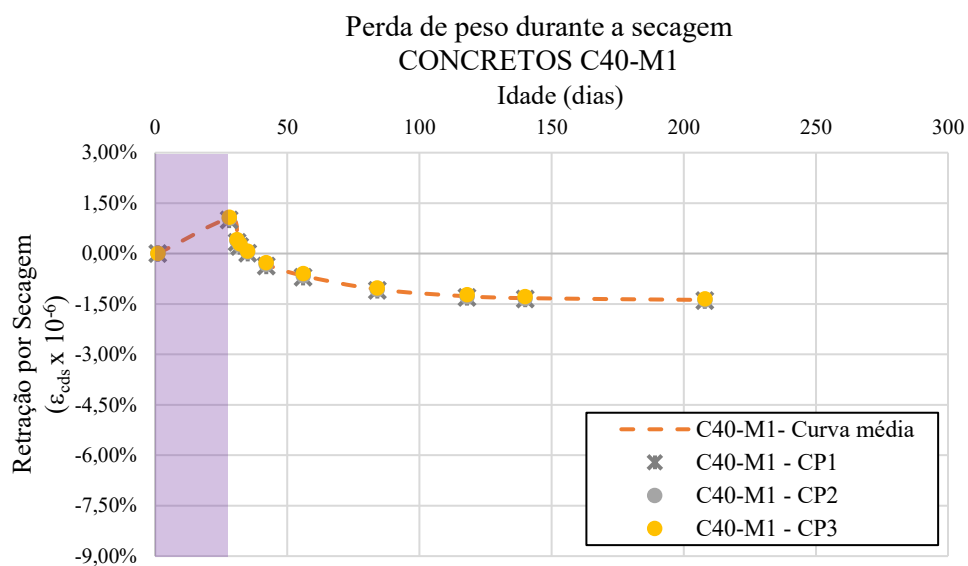


Gráfico 47 – Retração autógena nos CP do concreto C40-M1

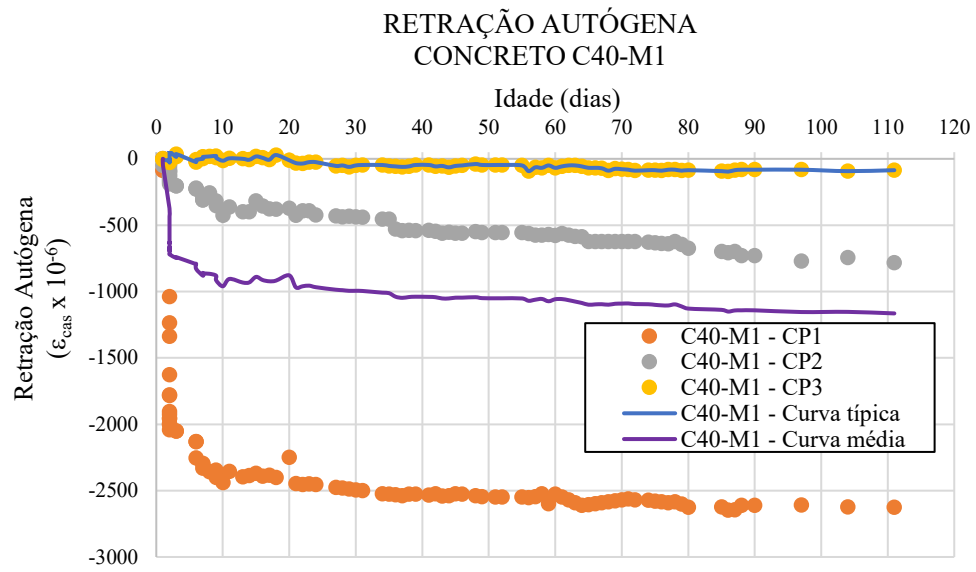


Gráfico 48 – Retração por secagem nos CP do concreto C40-M2

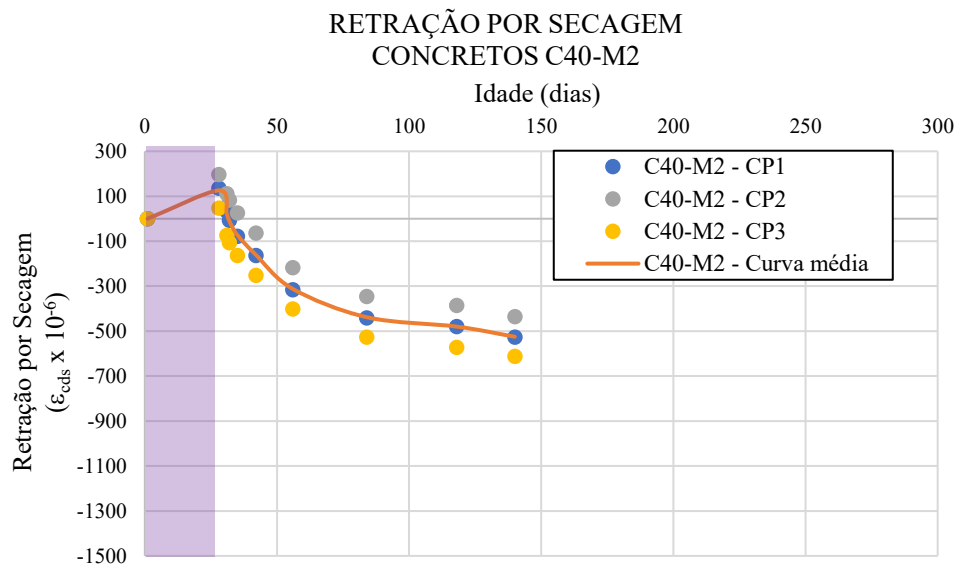


Gráfico 49 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto C40-M1

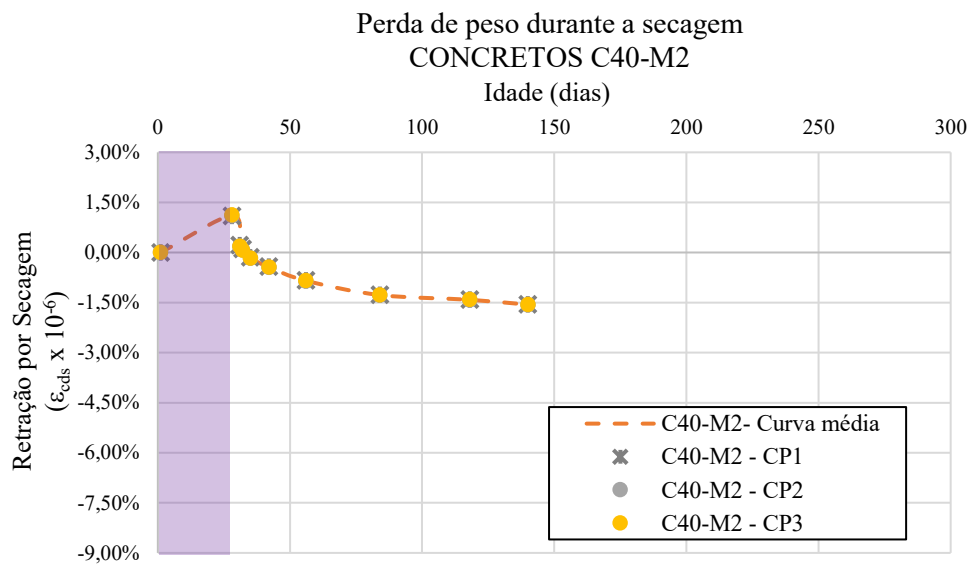


Gráfico 50 – Retração autógena nos CP do concreto C40-M2

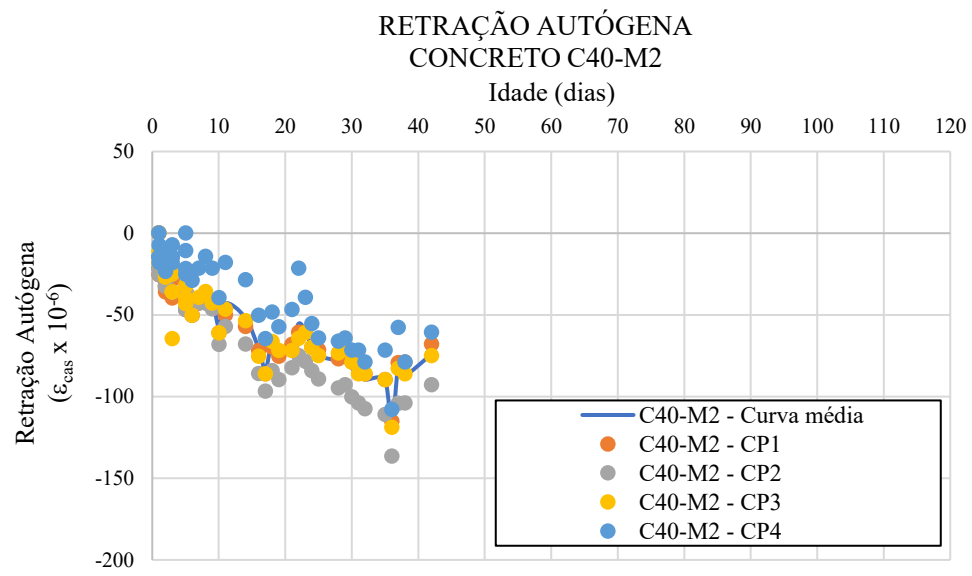


Gráfico 51 – Retração por secagem nos CP do concreto 25%RCA.

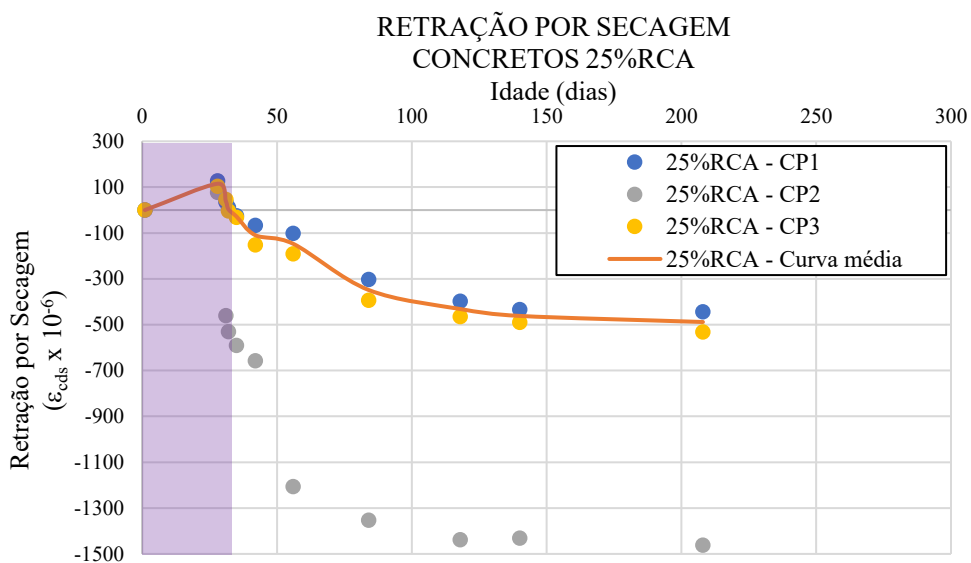


Gráfico 52 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto 25%RCA.

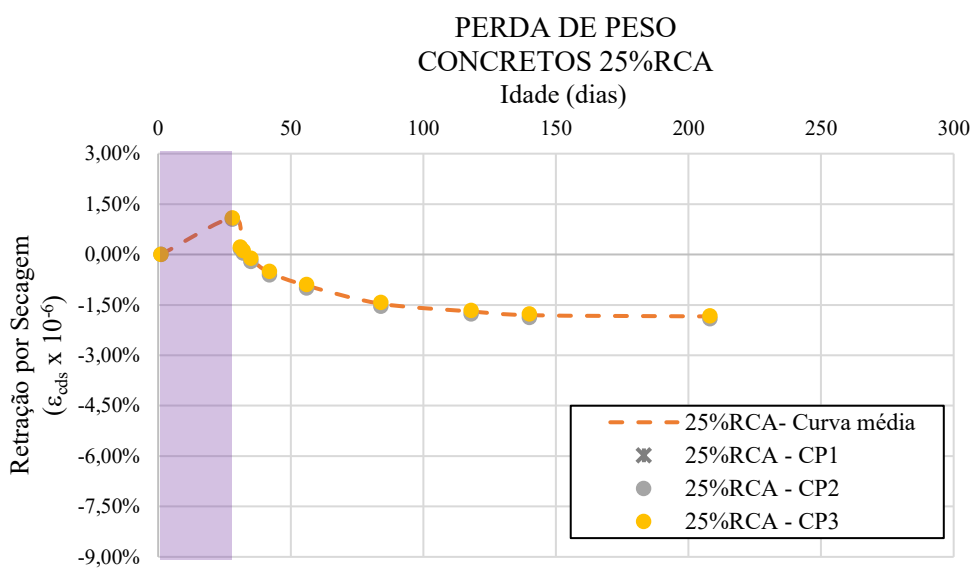


Gráfico 53 – Retração autógena nos CP do concreto 25%RCA.

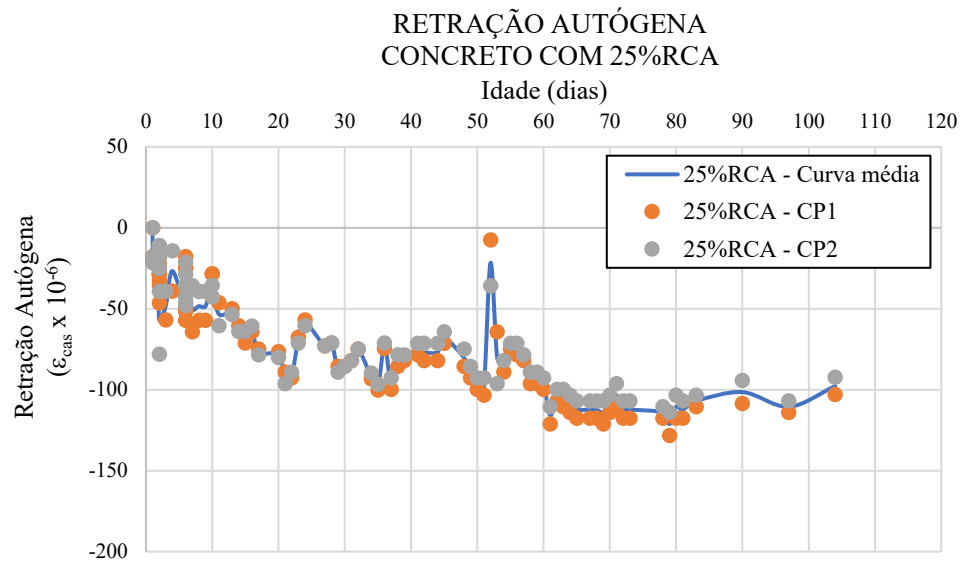


Gráfico 54 – Retração por secagem nos CP do concreto 50%RCA.

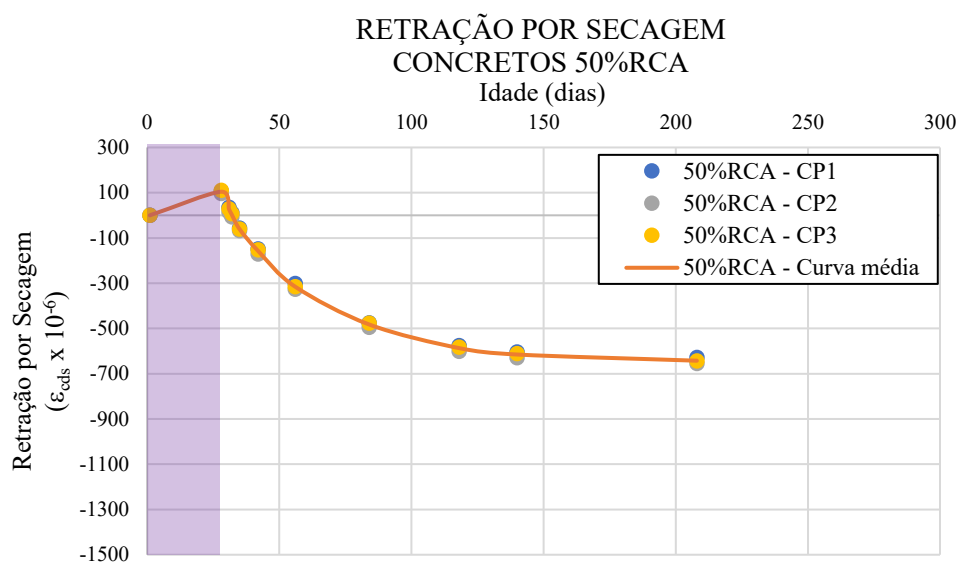


Gráfico 55 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto 50%RCA.

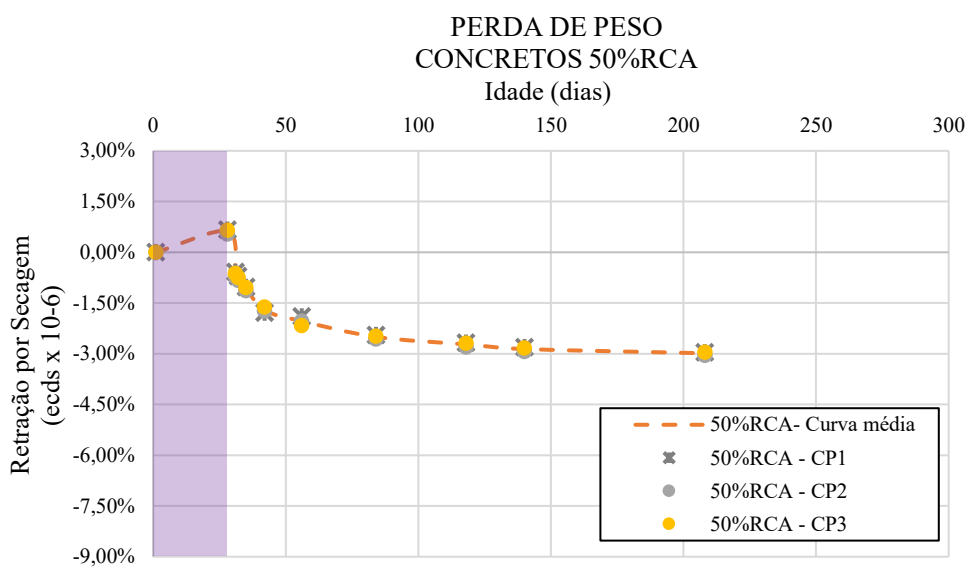


Gráfico 56 – Retração autógena nos CP do concreto 50%RCA.

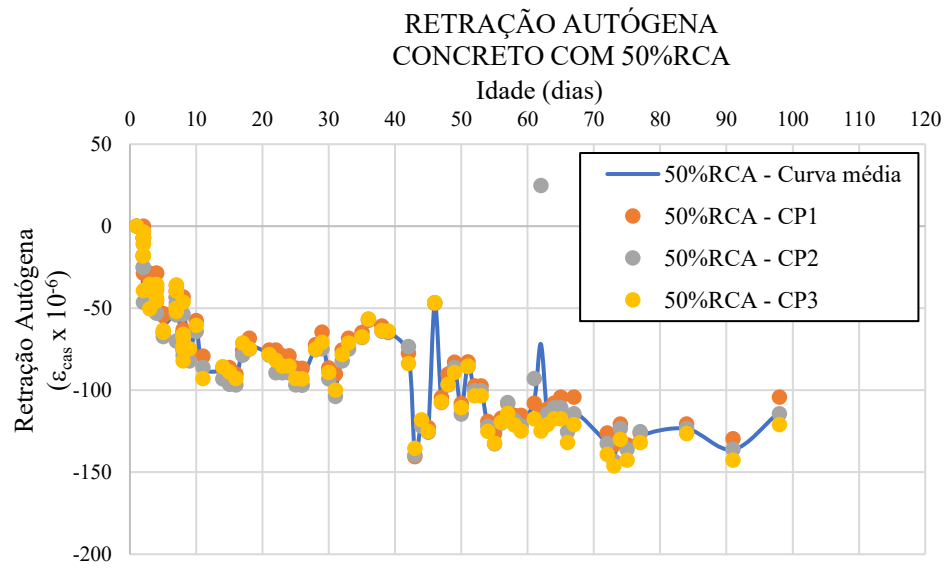


Gráfico 57 – Retração por secagem nos CP do concreto 75%RCA.

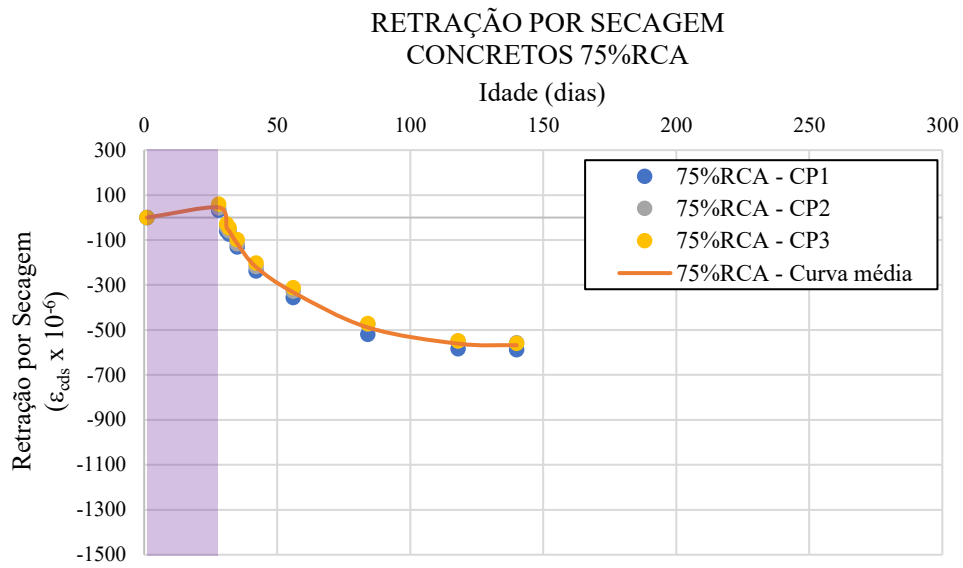


Gráfico 58 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto 75%RCA.

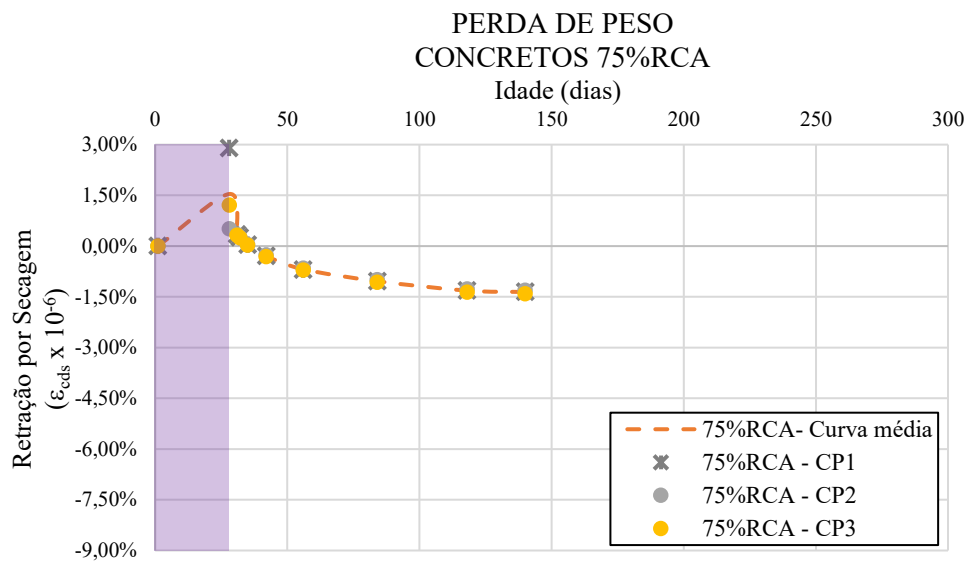


Gráfico 59 – Retração autógena nos CP do concreto 75%RCA.

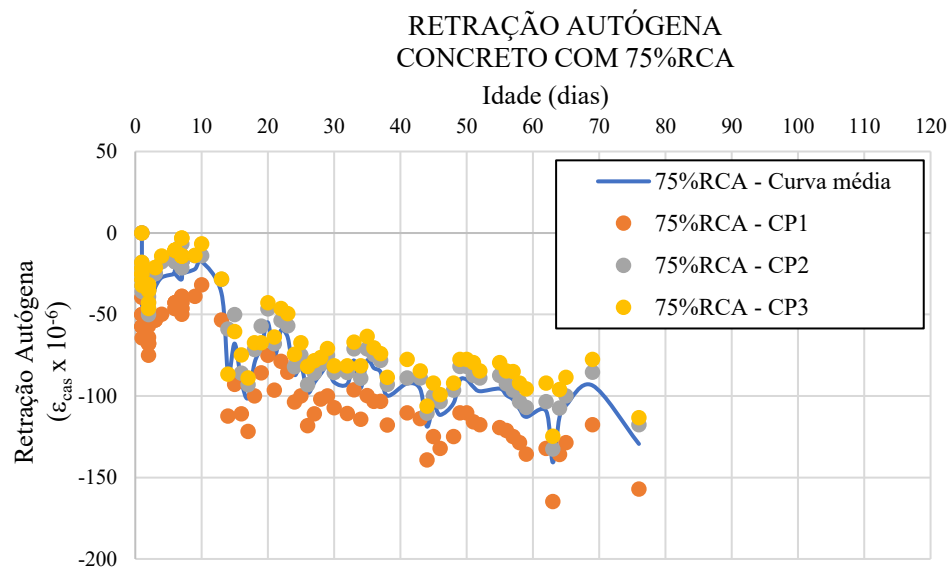


Gráfico 60 – Retração por secagem nos CP do concreto 100%RCA.

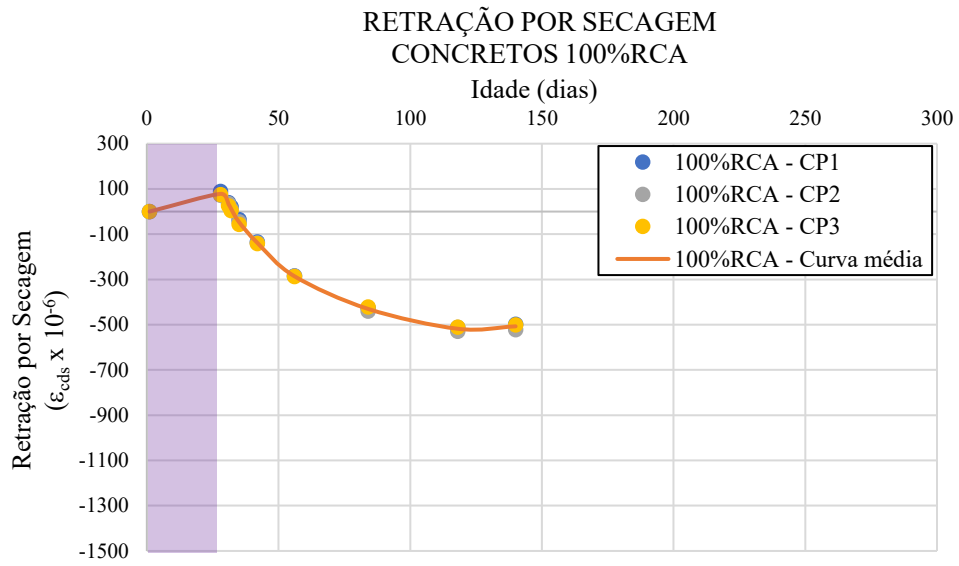


Gráfico 61 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto 100%RCA.

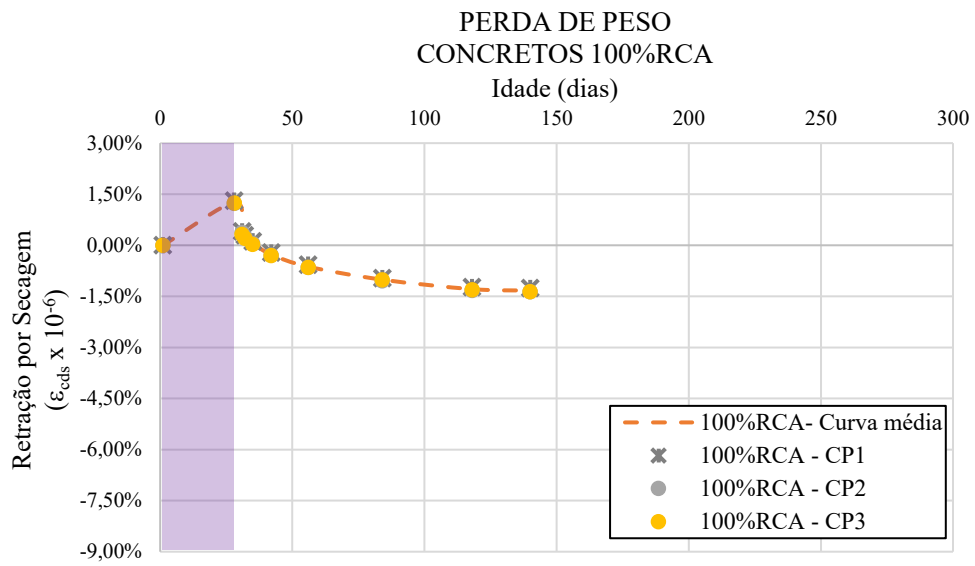


Gráfico 62 – Retração autógena nos CP do concreto 100%RCA.

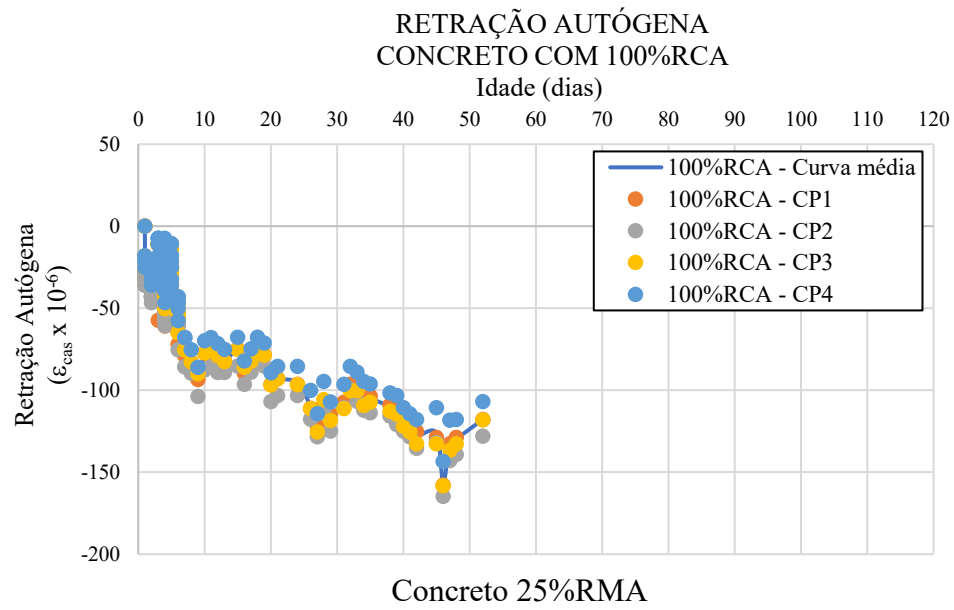


Gráfico 63 – Retração por secagem nos CP do concreto 25%RMA.

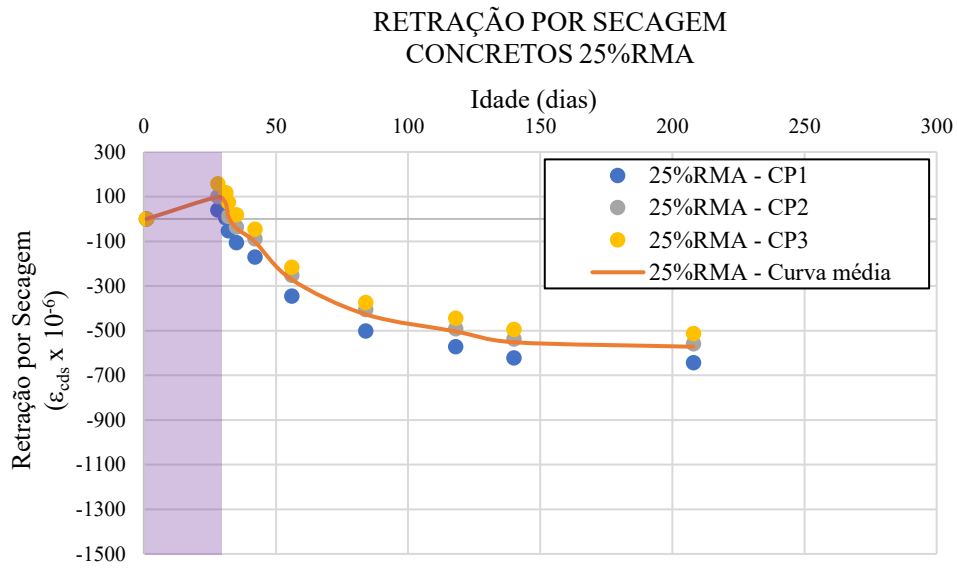


Gráfico 64 - Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto 25%RMA.

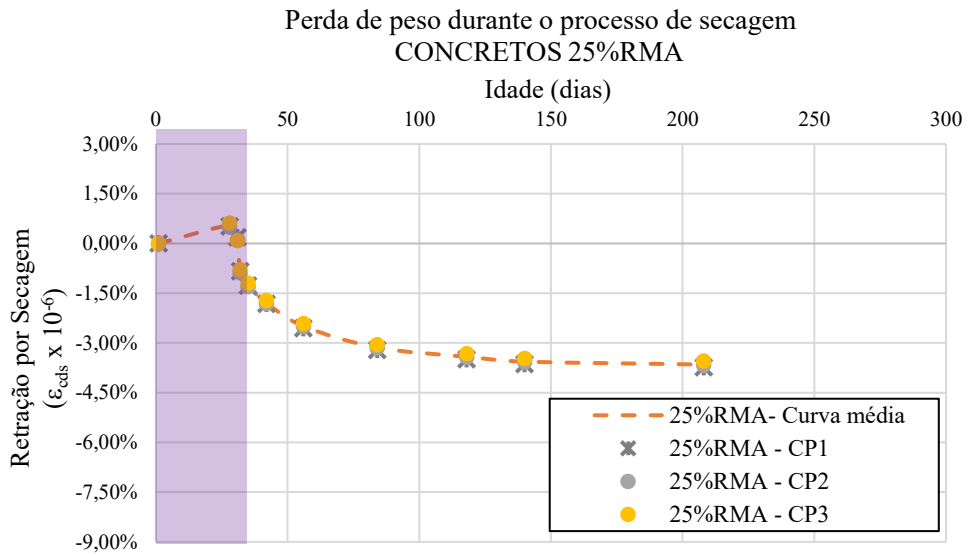


Gráfico 65 – Retração autógena nos CP do concreto 25%RMA.

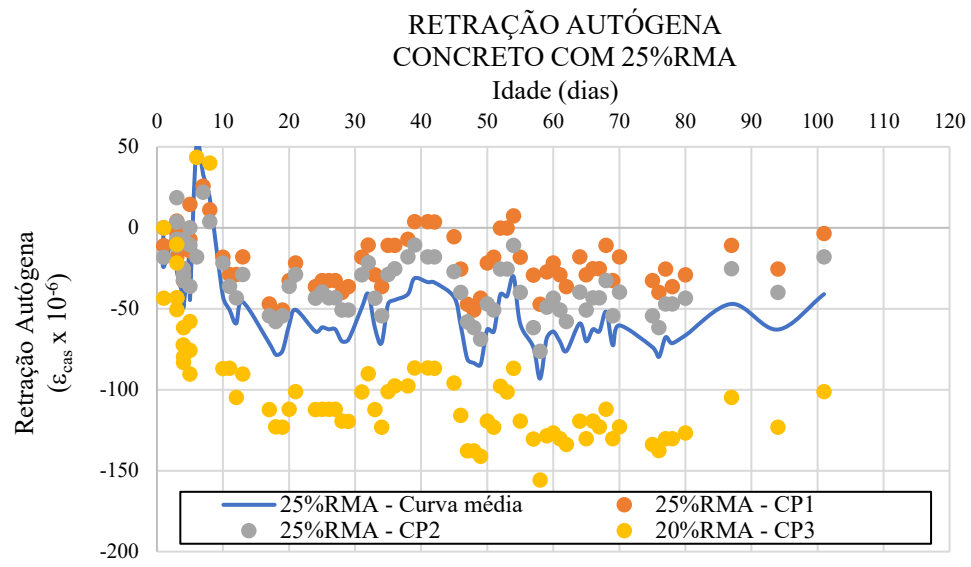


Gráfico 66 – Retração por secagem nos CP do concreto 50%RMA.

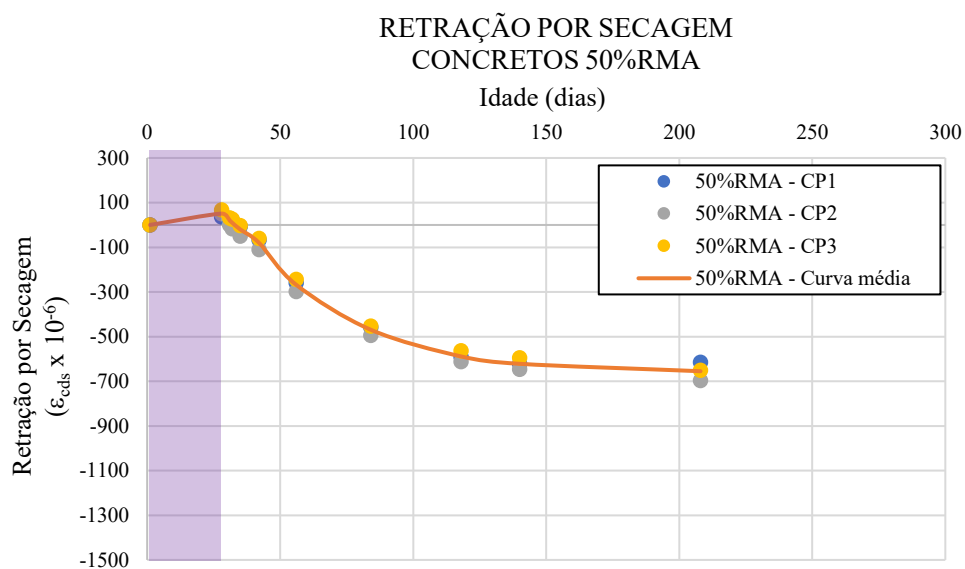


Gráfico 67 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto 50%RMA.

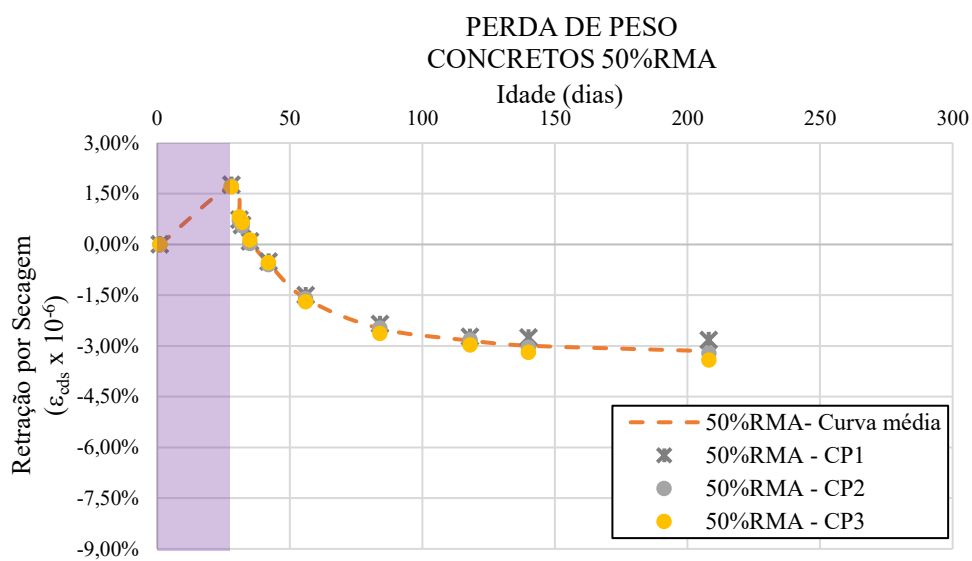


Gráfico 68 – Retração autógena nos CP do concreto 50%RMA.

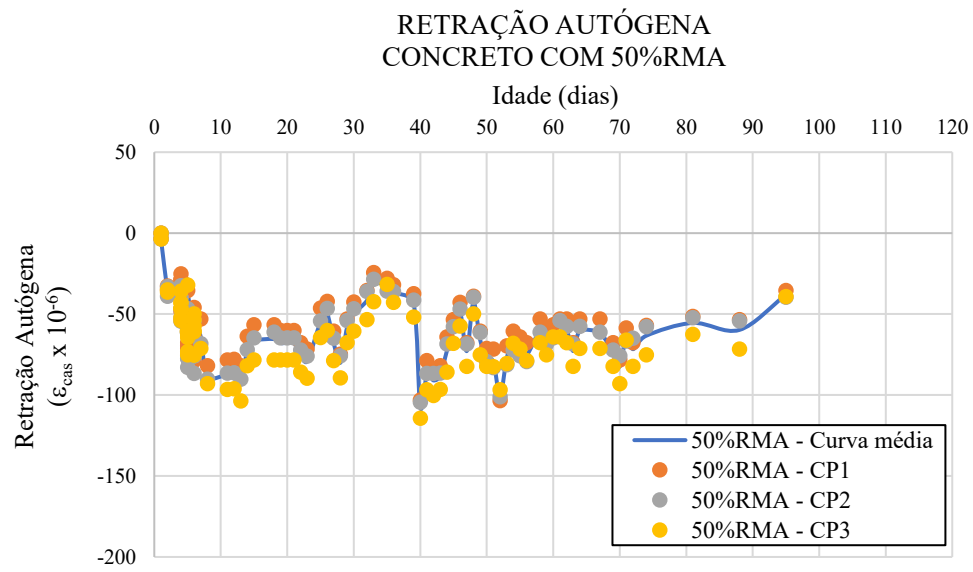


Gráfico 69 – Retração por secagem nos CP do concreto 75%RMA.

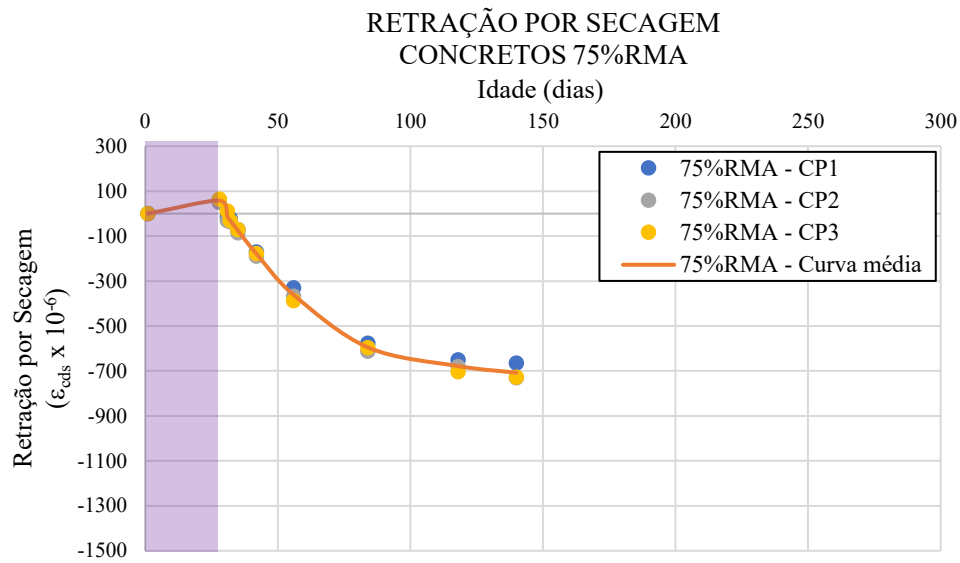


Gráfico 70 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto 75%RMA.

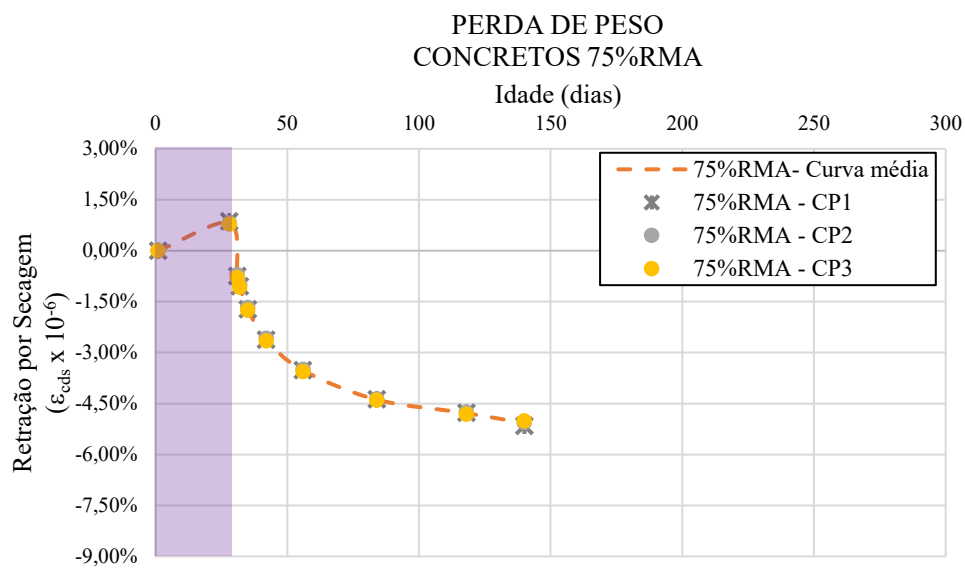


Gráfico 71 – Retração autógena nos CP do concreto 75%RMA.

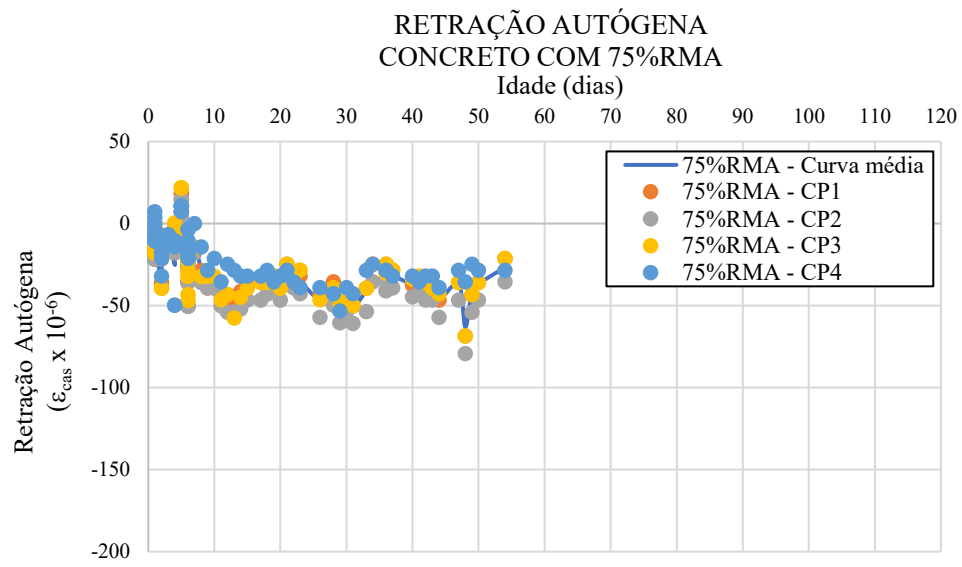


Gráfico 72 – Retração por secagem nos CP do concreto 100%RMA.

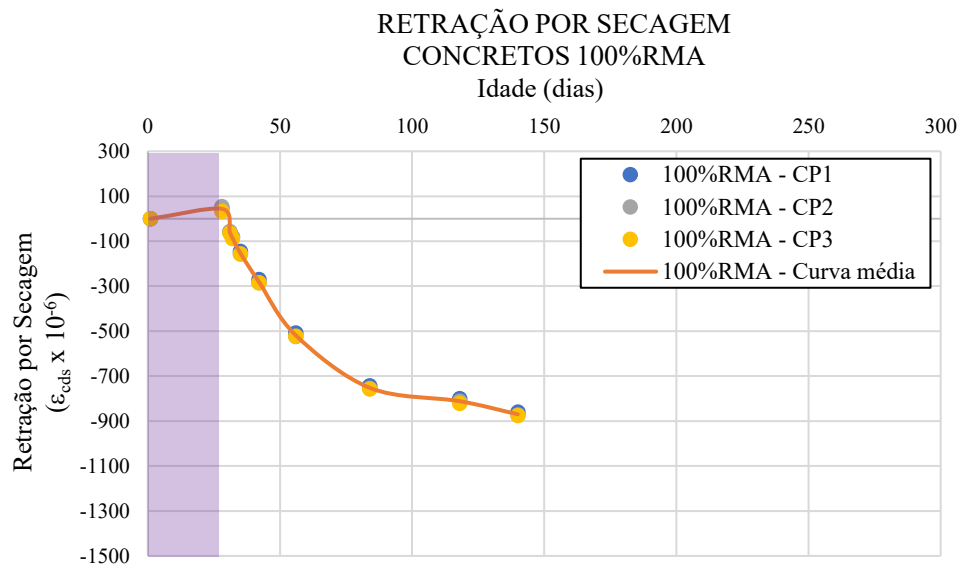


Gráfico 73 – Perda de peso dos espécimes durante o processo de secagem do concreto 75%RMA.

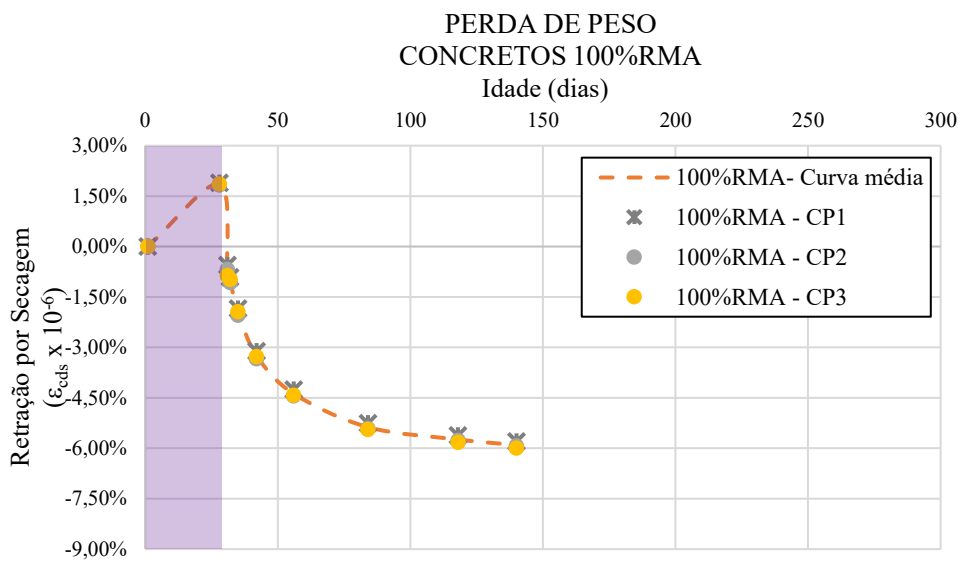


Gráfico 74 – Retração autógena nos CP do concreto 75%RMA.

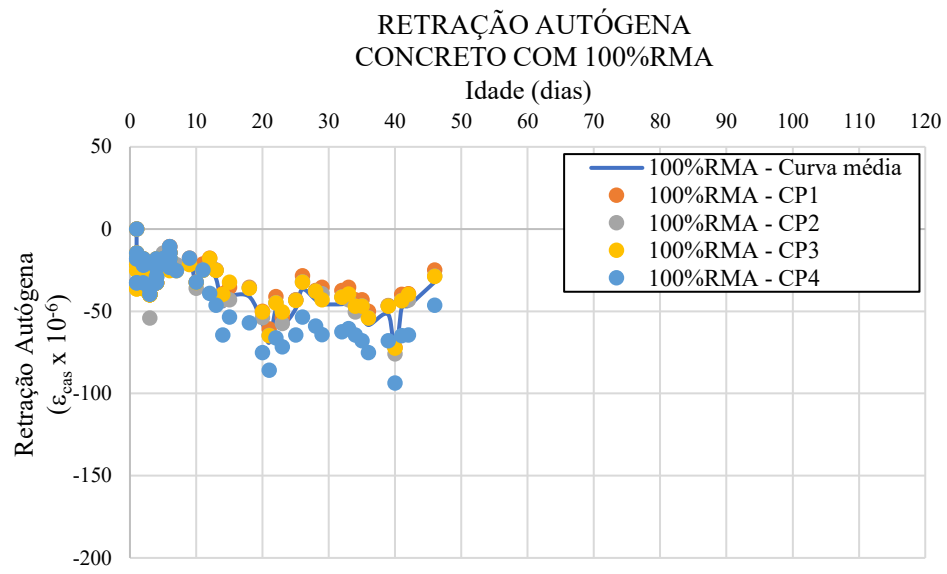


Tabela 54 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto C40-M1.

NBR 5739:2018 - Ensaio de compressão Concreto C40-M1				
Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	0,00	0,00	0	0
CP2 7 dias	0,00	0,00	0	0
CP3 7 dias	0,00	0,00	0	0
CP1 14 dias	33060,00	330,60	4,20933	42,09
CP2 14 dias	33690,00	336,90	4,289544	42,9
CP3 14 dias	32970,00	329,70	4,197871	41,98
CP1 21 dias	33680,00	336,80	4,288271	42,88
CP2 21 dias	34240,00	342,40	4,359572	43,6
CP3 21 dias	33710,00	337,10	4,292091	42,92
CP1 28 dias	35570,00	355,70	4,528913	45,29
CP2 28 dias	35630,00	356,30	4,536552	45,37
CP3 28 dias	36900,00	369,00	4,698254	46,98
CP4 28 dias	34600,00	346,00	4,405409	44,05
CP5 28 dias	34960,00	349,60	4,451245	44,51

Tabela 55 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto C40-M1.

Valores médios de resistência à compressão do concreto C40 – M1 nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
14 dias	42,32 MPa
21 dias	43,13 MPa
28 dias	45,25 MPa

Tabela 56 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto C40-M1.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto C40 – M1					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
C40-M1 - CP1	26/02/2019	11,5	11500	36,60564	3,66
C40-M1 - CP2	26/02/2019	11,1	11100	35,3324	3,53
C40-M1 - CP3	26/02/2019	11,4	11400	36,28733	3,63
				Média : 3,61	

Tabela 57 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C40-M1 – CP1

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C40-M1										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C40-M1	CP1	-	393	7869,7	0,489895	7	2	4,5	0	-
		20%	7120		8,875459	32	33	32,5	0,00028	29,95
		30%	10680		13,31319	48	58	53	0,000485	26,44
		40%	14240		17,75092	60	83	71,5	0,00067	25,76
		50%	17800		22,18865	77	103	90	0,000855	25,38
		60%	21360		26,62638	95	120	107,5	0,00103	25,38
		70%	24920		31,06411	122	143	132,5	0,00128	23,89
		80%	28480		35,50184	154	185	169,5	0,00165	21,22

Tabela 58 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C40-M1 – CP2

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C40-M1										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C40-M1	CP2	-	393	7964,3	0,489895	2	3	2,5	0	-
		20%	7120		8,875459	31	32	31,5	0,00027	31,06
		30%	10680		13,31319	54	48	51	0,000465	27,58
		40%	14240		17,75092	77	67	72	0,000675	25,57
		50%	17800		22,18865	93	89	91	0,000865	25,09
		60%	21360		26,62638	109	114	111,5	0,00107	24,43
		70%	24920		31,06411	127	142	134,5	0,0013	23,52
		80%	28480		35,50184	155	177	166	0,001615	21,68

Tabela 59 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C40-M1 – CP3

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C40-M1										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C40-M1	CP3	-	393	7948,5	0,489895	6	4	5	0	-
		20%	7120		8,875459	42	34	38	0,000335	25,03
		30%	10680		13,31319	58	53	55,5	0,00051	25,14
		40%	14240		17,75092	72	68	70	0,000655	26,35
		50%	17800		22,18865	90	84	87	0,000825	26,3
		60%	21360		26,62638	106	103	104,5	0,001	26,14
		70%	24920		31,06411	126	130	128	0,001235	24,76
		80%	28480		35,50184	147	152	149,5	0,00145	24,15

Tabela 60 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto C40-M2.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto C40 – M2

Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	23400,00	234,00	2,979381	29,79
CP2 7 dias	23510,00	235,10	2,993386	29,93
CP3 7 dias	24080,00	240,80	3,065961	30,66
CP1 14 dias	25490,00	254,90	3,245488	32,45
CP2 14 dias	25020,00	250,20	3,185645	31,86
CP3 14 dias	25380,00	253,80	3,231482	32,31
CP1 21 dias	0,00	0,00	0	0
CP2 21 dias	0,00	0,00	0	0
CP3 21 dias	0,00	0,00	0	0
CP1 28 dias	29360,00	293,60	3,738231	37,38
CP2 28 dias	29570,00	295,70	3,764969	37,65
CP3 28 dias	28500,00	285,00	3,628733	36,29
CP4 28 dias	0,00	0,00	0	0
CP5 28 dias	0,00	0,00	0	0

Tabela 61 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto C40-M2.

Valores médios de resistência à compressão do concreto C40 – M2 nas idades avaliadas

Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
7 dias	30,13 MPa
14 dias	32,21 MPa
28 dias	37,11 MPa

Tabela 62 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto C40-M2.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto C40 – M2

Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
C40-M2 - CP1	26/02/2019	12,9	12900	41,06198	4,11
C40-M2 - CP2	26/02/2019	12,7	12700	40,42536	4,04
C40-M2 - CP3	26/02/2019	11,2	11200	35,65071	3,57
				Média : 3,91	

Tabela 63 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C40-M2 – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C40-M2										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C40-M2	CP1	-	393	7948,5	0,485038	1	4	2,5	0	-
		20%	6165		7,608801	26	28	27	0,000245	29,08
		30%	9247		11,41258	44	37	40,5	0,00038	28,76
		40%	12330		15,2176	60	44	52	0,000495	29,76
		50%	15412		19,02139	74	54	64	0,000615	30,14
		60%	18495		22,8264	95	61	78	0,000755	29,59
		70%	21577		26,63019	121	67	94	0,000915	28,57
		80%	24660		30,43521	149	77	113	0,001105	27,1

Tabela 64 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C40-M2 – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C40-M2										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C40-M2	CP2	-	393	7964,3	0,485038	5	0	2,5	0	-
		20%	6165		7,608801	24	25	24,5	0,00022	32,38
		30%	9247		11,41258	36	36	36	0,000335	32,62
		40%	12330		15,2176	51	48	49,5	0,00047	31,35
		50%	15412		19,02139	67	60	63,5	0,00061	30,39
		60%	18495		22,8264	90	71	80,5	0,00078	28,64
		70%	21577		26,63019	113	83	98	0,000955	27,38
		80%	24660		30,43521	135	98	116,5	0,00114	26,27

Tabela 65 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C40-M2 – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C40-M2										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C40-M2	CP3	-	393	7869,7	0,485038	2	0	1	0	-
		20%	6165		7,608801	26	22	24	0,000215	33,13
		30%	9247		11,41258	38	30	34	0,000315	34,69
		40%	12330		15,2176	56	38	47	0,000445	33,11
		50%	15412		19,02139	79	44	61,5	0,00059	31,42
		60%	18495		22,8264	104	50	77	0,000745	29,99
		70%	21577		26,63019	131	58	94,5	0,00092	28,42
		80%	24660		30,43521	159	70	114,5	0,00112	26,74

Tabela 66 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto C60-ARI.

NBR 5739:2018 - Ensaio de compressão Concreto C60-ARI				
Corpo de prova	Força resistida		f_{cj}	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 _{28 dias}	49660,00	496,60	6,326	63,26
CP2 _{28 dias}	47190,00	471,90	6,011	60,11
CP3 _{28 dias}	47870,00	478,70	6,098	60,98

Tabela 67 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto C60-ARI.

Valores médios de resistência à compressão do concreto C60-ARI nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	f_{cj} médio
28 dias	61,45 MPa

Tabela 68 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto C60-ARI.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto C60-ARI					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
C60-ARI - CP1	26/02/2019	14,2	45200	40,7	4,07
C60-ARI - CP2	26/02/2019	15,2	15200	43,6	4,36
C60-ARI - CP3	26/02/2019	17,0	17000	48,7	4,87
				Média :	4,43

Tabela 69 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C60-ARI – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C60-ARI										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C60-ARI	CP1	-	393	7854,0	0,5	0	2	1	0	-
		20%	9648		12,1	36	39	37,5	0,000365	31,67
		30%	14472		18,1	62	49	55,5	0,000545	32,27
		40%	19296		24,1	88	63	75,5	0,000745	31,69
		50%	24120		30,1	115	77	96	0,00095	31,2
		60%	28944		36,2	148	93	120,5	0,001195	29,84
		70%	33768		42,2	186	109	147,5	0,001465	28,46
		80%	38592		48,2	227	124	175,5	0,001745	27,34

Tabela 70 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C60-ARI – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C60-ARI										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C60-ARI	CP2	-	393	7854,0	0,490875	4	2	3	0	-
		20%	9648		12,05079	37	30	33,5	0,000325	35,57
		30%	14472		18,07618	57	47	52	0,00051	34,48
		40%	19296		24,10157	77	65	71	0,0007	33,73
		50%	24120		30,12697	98	85	91,5	0,000905	32,75
		60%	28944		36,15236	120	107	113,5	0,001125	31,7
		70%	33768		42,17775	147	132	139,5	0,001385	30,1
		80%	38592		48,20315	178	158	168	0,00167	28,57

Tabela 71 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C60-ARI – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C60-ARI										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C60-ARI	CP3	-	393	7854,0	0,490875	2	7	4,5	0	-
		20%	9648		12,05079	33	41	37	0,00036	32,11
		30%	14472		18,07618	62	57	59,5	0,000585	30,06
		40%	19296		24,10157	91	70	80,5	0,000795	29,7
		50%	24120		30,12697	122	83	102,5	0,001015	29,2
		60%	28944		36,15236	163	99	131	0,0013	27,43
		70%	33768		42,17775	203	113	158	0,00157	26,55
		80%	38592		48,20315	257	129	193	0,00192	24,85

Tabela 72 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto C60-CP II.

NBR 5739:2018 - Ensaio de compressão Concreto C60 - CP II				
Corpo de prova	Força resistida		f_{cj}	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 _{28 dias}	38960,00	389,60	4,963	49,63
CP2 _{28 dias}	38200,00	382,00	4,866	48,66
CP3 _{28 dias}	40690,00	406,90	5,183	51,83

Tabela 73 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto C60-CP II.

Valores médios de resistência à compressão do concreto C60 - CP II nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	f_{cj} médio
28 dias	50,04 MPa

Tabela 74 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto C60-CP II.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto C60 - CP II					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
C60 - CP II - CP1	26/02/2019	9,5	9500	27,2	2,72
C60 - CP II - CP2	26/02/2019	9,30	9300	26,7	2,67
C60 - CP II - CP3	26/02/2019	13,5	13500	38,7	3,87
				Média : 3,30	

Tabela 75 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C60-CP II – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C60-CP II										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C60-CP II	CP1	-	393,0	7854	0,5	5	5	5	0	-
		20%	7856,7		9,8	28	42	35	0,0003	31,07
		30%	11785,0		14,7	40	70	55	0,0005	28,46
		40%	15713,3		19,6	49	100	74,5	0,000695	27,53
		50%	19641,7		24,5	57	136	96,5	0,000915	26,28
		60%	23570,0		29,4	63	187	125	0,0012	24,12
		70%	27498,3		34,3	75	196	135,5	0,001305	25,94
		80%	31426,7		39,3	90	227	158,5	0,001535	25,25

Tabela 76 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C60-CP II – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C60-CP II										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C60-CP II	CP2	-	393,0	7854	0,5	3	2	2,5	0	-
		20%	7856,7		9,8	30	35	32,5	0,000275	33,9
		30%	11785,0		14,7	38	60	49	0,00044	32,34
		40%	15713,3		19,6	45	90	67,5	0,000625	30,62
		50%	19641,7		24,5	50	120	85	0,0008	30,05
		60%	23570,0		29,4	53	154	103,5	0,000985	29,39
		70%	27498,3		34,3	65	185	125	0,0012	28,21
		80%	31426,7		39,3	77	225	151	0,00146	26,55

Tabela 77 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto C60-CP II – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto C60-CP II										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
C60-CP II	CP3	-	393,0	7854	0,5	8	2	5	0	-
		20%	7856,7		9,8	30	38	34	0,00029	32,15
		30%	11785,0		14,7	48	56	52	0,00047	30,27
		40%	15713,3		19,6	67	74	70,5	0,000655	29,21
		50%	19641,7		24,5	90	91	90,5	0,000855	28,12
		60%	23570,0		29,4	112	112	112	0,00107	27,06
		70%	27498,3		34,3	144	139	141,5	0,001365	24,8
		80%	31426,7		39,3	180	164	172	0,00167	23,21

Tabela 78 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 25%RMA.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto 25%RMA				
Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	20580,00	205,80	2,620327	26,2
CP2 7 dias	20470,00	204,70	2,606321	26,06
CP3 7 dias	22600,00	226,00	2,877521	28,78
CP1 14 dias	26540,00	265,40	3,379178	33,79
CP2 14 dias	21700,00	217,00	2,76293	27,63
CP3 14 dias	23650,00	236,50	3,011212	30,11
CP1 28 dias	28180,00	281,80	3,587989	35,88
CP2 28 dias	28910,00	289,10	3,680936	36,81
CP3 28 dias	27870,00	278,70	3,548519	35,49

Tabela 79 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 25%RMA.

Valores médios de resistência à compressão do concreto 25%RMA nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
7 dias	27,01 MPa
14 dias	30,51 MPa
28 dias	36,06 MPa

Tabela 80 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto 25%RMA.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto 25%RMA					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
25%RMA - CP1	14/03/2019	11,8	11800	37,56057	3,76
25%RMA - CP2	14/03/2019	11,1	11100	35,3324	3,53
25%RMA - CP3	14/03/2019	11,2	11200	35,65071	3,57
Média :					3,62

Tabela 81 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 25%RMA – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 25%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
25%RMA	CP1	-	393	7891,7	0,48853	1	4	2,5	0	-
		20%	5858		7,281952	23	31	27	0,000245	27,73
		30%	8787		10,92293	37	45	41	0,000385	27,1
		40%	11716		14,5639	54	63	58,5	0,00056	25,13
		50%	14645		18,20488	73	81	77	0,000745	23,78
		60%	17574		21,84586	93	104	98,5	0,00096	22,25
		70%	20503		25,48683	114	129	121,5	0,00119	21,01
		80%	23432		29,12781	-	-	-	-	-

Tabela 82 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 25%RMA – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 25%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
25%RMA	CP2	-	393	8072,2	0,48853	3	3	3	0	-
		20%	5858		7,281952	22	27	24,5	0,00022	30,88
		30%	8787		10,92293	34	40	37	0,000345	30,24
		40%	11716		14,5639	50	58	54	0,000515	27,33
		50%	14645		18,20488	67	75	71	0,000685	25,86
		60%	-		-	-	-	-	-	-
		70%	20503		25,48683	106	111	108,5	0,00106	23,58
		80%	23432		29,12781	-	-	-	-	-

Tabela 83 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 25%RMA – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 25%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
25%RMA	CP3	-	393	7964,3	0,48853	1	1	1	0	-
		20%	5858		7,281952	20	22	21	0,000315	33,13
		30%	8787		10,92293	32	36	34	0,000475	29,63
		40%	11716		14,5639	46	54	50	0,00064	27,68
		50%	14645		18,20488	63	70	66,5	0,000885	24,13
		60%	17574		21,84586	92	90	91	0,001025	24,39
		70%	20503		25,48683	102	108	105	-	-
		80%	23432		29,12781	-	-	-	-	-

Tabela 84 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 50%RMA.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto 75%RMA				
Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	21290,00	212,90	2,710727	27,11
CP2 7 dias	21350,00	213,50	2,718366	27,18
CP3 7 dias	20990,00	209,90	2,67253	26,73
CP1 14 dias	21480,00	214,80	2,734919	27,35
CP2 14 dias	23510,00	235,10	2,993386	29,93
CP3 14 dias	22570,00	225,70	2,873702	28,74
CP1 28 dias	23620,00	236,20	3,007392	30,07
CP2 28 dias	23100,00	231,00	2,941183	29,41
CP3 28 dias	26190,00	261,90	3,334614	33,35

Tabela 85 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 50%RMA.

Valores médios de resistência à compressão do concreto 50%RMA nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
7 dias	27,01 MPa
14 dias	28,67 MPa
28 dias	30,94 MPa

Tabela 86 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto 50%RMA.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto 50%RMA					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
50%RMA - CP1	26/03/2019	10	10000	31,83099	3,18
50%RMA - CP2	26/03/2019	9,2	9200	29,28451	2,93
50%RMA - CP3	26/03/2019	10,9	10900	34,69578	3,47
Média :					3,19

Tabela 87 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 50%RMA – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 50%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
50%RMA	CP1	-	393	8005,5	0,481585	0	1	0,5	0	-
		20%	5364		6,573086	23	23	23	0,000225	27,07
		30%	8046		9,859629	39	35	37	0,000365	25,69
		40%	10728		13,14617	56	47	51,5	0,00051	24,83
		50%	13410		16,43272	74	61	67,5	0,00067	23,81
		60%	16092		19,71926	96	74	85	0,000845	22,77
		70%	18774		23,0058	120	88	104	0,001035	21,76
		80%	19990		24,4959	133	96	114,5	0,00114	21,07

Tabela 88 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 50%RMA – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 50%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
50%RMA	CP2	-	393	7817,1	0,481585	2	0	1	0	-
		20%	5364		6,573086	18	21	19,5	0,00019	32,06
		30%	8046		9,859629	26	38	32	0,000315	29,77
		40%	10728		13,14617	33	59	46	0,000455	27,83
		50%	13410		16,43272	40	84	62	0,000615	25,94
		60%	16092		19,71926	45	114	79,5	0,00079	24,35
		70%	18774		23,0058	52	144	98	0,000975	23,1
		80%	19990		24,4959	58	166	112	0,001115	21,54

Tabela 89 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 50%RMA – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 50%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
50%RMA	CP3	-	393	79004	0,481585	0	3	1,5	0	-
		20%	5364		6,573086	21	20	20,5	0,0002	30,46
		30%	8046		9,859629	35	33	34	0,000335	27,99
		40%	10728		13,14617	50	44	47	0,000465	27,24
		50%	13410		16,43272	65	56	60,5	0,0006	26,59
		60%	16092		19,71926	85	68	76,5	0,00076	25,31
		70%	18774		23,0058	109	79	94	0,000935	24,09
		80%	19990		24,4959	123	86	104,5	0,00104	23,09

Tabela 90 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 75%RMA.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto 75%RMA				
Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	16060,00	160,60	2,044823	20,45
CP2 7 dias	14270,00	142,70	1,816913	18,17
CP3 7 dias	15530,00	155,30	1,977341	19,77
CP1 14 dias	16480,00	164,80	2,098299	20,98
CP2 14 dias	16460,00	164,60	2,095752	20,96
CP3 14 dias	15980,00	159,80	2,034637	20,35
CP1 28 dias	17960,00	179,60	2,286738	22,87
CP2 28 dias	18080,00	180,80	2,302017	23,02
CP3 28 dias	18340,00	183,40	2,335121	23,35

Tabela 91 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 75%RMA.

Valores médios de resistência à compressão do concreto 75%RMA nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
7 dias	19,46 MPa
14 dias	20,76 MPa
28 dias	23,08 MPa

Tabela 92 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto 75%RMA.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto 75%RMA					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
75%RMA - CP1	26/03/2019	8,8	8800	28,01127	2,8
75%RMA - CP2	26/03/2019	8,9	8900	28,32958	2,83
75%RMA - CP3	26/03/2019	9	9000	28,64789	2,86
Média :					2,83

Tabela 93 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 75%RMA – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 75%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
75%RMA	CP1	-	393	8213	0,469418	2	2	2	2	0
		20%	4782		5,71185	29	22	25,5	23,75	0,0002175
		30%	7173		8,567774	49	29	39	34	0,00032
		40%	9564		11,4237	71	44	57,5	50,75	0,0004875
		50%	11955		14,27962	92	55	73,5	64,25	0,0006225
		60%	14346		17,13555	122	68	95	81,5	0,000795
		70%	16737		19,99147	159	85	122	103,5	0,001015
		80%	19128		22,8474	204	105	154,5	129,75	0,0012775

Tabela 94 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 75%RMA – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 75%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
75%RMA	CP2	-	393	7854	0,469418	0	4	2	3	0
		20%	4782		5,71185	24	24	24	24	0,00022
		30%	7173		8,567774	44	39	41,5	40,25	0,0003825
		40%	9564		11,4237	64	53	58,5	55,75	0,0005375
		50%	11955		14,27962	90	68	79	73,5	0,000715
		60%	14346		17,13555	121	83	102	92,5	0,000905
		70%	16737		19,99147	161	96	128,5	112,25	0,0011025
		80%	19128		22,8474	230	108	169	138,5	0,001365

Tabela 95 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 75%RMA – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 75%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
75%RMA	CP3	-	393	7999,2	0,469418	0	2	1	1,5	0
		20%	4782		5,71185	21	28	24,5	26,25	0,0002425
		30%	7173		8,567774	36	42	39	40,5	0,000385
		40%	9564		11,4237	54	58	56	57	0,00055
		50%	11955		14,27962	76	75	75,5	75,25	0,0007325
		60%	14346		17,13555	100	97	98,5	97,75	0,0009575
		70%	16737		19,99147	128	122	125	123,5	0,001215
		80%	19128		22,8474	166	155	160,5	157,75	0,0015575

Tabela 96 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 100%RMA.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto 100%RMA				
Corpo de prova	Força resistida		f_{cj}	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	12070,00	120,70	1,5368	15,37
CP2 7 dias	12350,00	123,50	1,572451	15,72
CP3 7 dias	10750,00	107,50	1,368733	13,69
CP1 14 dias	14480,00	144,80	1,843651	18,44
CP2 14 dias	14480,00	144,80	1,843651	18,44
CP3 14 dias	13850,00	138,50	1,763437	17,63
CP1 28 dias	17510,00	175,10	2,229442	22,29
CP2 28 dias	19510,00	195,10	2,48409	24,84
CP3 28 dias	18240,00	182,40	2,322389	23,22

Tabela 97 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 100%RMA.

Valores médios de resistência à compressão do concreto 100%RMA nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	f_{cj} médio
7 dias	14,93 MPa
14 dias	18,71 MPa
28 dias	23,45 MPa

Tabela 98 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto 100%RMA.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto 100%RMA					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
100%RMA - CP1	26/03/2019	7,4	7400	23,55493	2,36
100%RMA - CP2	26/03/2019	8,1	8100	25,7831	2,58
100%RMA - CP3	26/03/2019	7,4	7400	23,55493	2,36
Média :					2,43

Tabela 99 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 100%RMA – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 100%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
100%RMA	CP1	-	393	7869,7	0,489895	5	3	4	0	-
		20%	4071		5,074718	30	22	26	0,00022	20,84
		30%	6106		7,611454	49	32	40,5	0,000365	19,51
		40%	8142		10,14944	67	46	56,5	0,000525	18,4
		50%	10177		12,68617	91	62	76,5	0,000725	16,82
		60%	12213		15,22415	118	80	99	0,00095	15,51
		70%	14248		17,76089	157	102	129,5	0,001255	13,76
		80%	16284		20,29887	208	125	166,5	0,001625	12,19

Tabela 100 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 100%RMA – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 100%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
100%RMA	CP2	-	393	7964,3	0,489895	2	0	1	0	-
		20%	4071		5,074718	24	22	23	0,00019	24,13
		30%	6106		7,611454	32	39	35,5	0,000315	22,61
		40%	8142		10,14944	40	62	51	0,00047	20,55
		50%	10177		12,68617	47	88	67,5	0,000635	19,21
		60%	12213		15,22415	53	121	87	0,00083	17,75
		70%	14248		17,76089	58	163	110,5	0,001065	16,22
		80%	16284		20,29887	57	232	144,5	0,001405	14,1

Tabela 101 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 100%RMA – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 100%RMA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
100%RMA	CP3	-	393	7948,5	0,489895	3	0	1,5	0	-
		20%	4071		5,074718	28	22	25	0,00021	21,83
		30%	6106		7,611454	41	35	38	0,00034	20,95
		40%	8142		10,14944	58	50	54	0,0005	19,32
		50%	10177		12,68617	76	67	71,5	0,000675	18,07
		60%	12213		15,22415	99	90	94,5	0,000905	16,28
		70%	14248		17,76089	125	114	119,5	0,001155	14,95
		80%	16284		20,29887	165	149	157	0,00153	12,95

Tabela 102 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 25%RCA.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto 25%RCA				
Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	25090,00	250,90	3,194558	31,95
CP2 7 dias	24640,00	246,40	3,137262	31,37
CP3 7 dias	25890,00	258,90	3,296417	32,96
CP1 14 dias	26480,00	264,80	3,371538	33,72
CP2 14 dias	25660,00	256,60	3,267133	32,67
CP3 14 dias	26110,00	261,10	3,324428	33,24
CP1 28 dias	30530,00	305,30	3,8872	38,87
CP2 28 dias	28990,00	289,90	3,691121	36,91
CP3 28 dias	30790,00	307,90	3,920305	39,2

Tabela 103 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 25%RCA.

Valores médios de resistência à compressão do concreto 25%RCA nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
7 dias	32,09 MPa
14 dias	33,21 MPa
28 dias	38,33 MPa

Tabela 104 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto 25%RCA.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto 25%RCA					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
25%RCA - CP1	12/03/2019	11,7	11700	37,24226	3,72
25%RCA - CP2	12/03/2019	12,9	12900	41,06198	4,11
25%RCA - CP3	12/03/2019	11,2	11200	35,65071	3,57
				Média : 3,80	

Tabela 105 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 25%RCA – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 25%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
25%RCA	CP1	-	393	7854	0,490875	3	4	3,5	0	-
		20%	6190		7,731589	25	29	27	0,000235	30,81
		30%	9280		11,59114	35	44	39,5	0,00036	30,83
		40%	12370		15,45069	44	64	54	0,000505	29,62
		50%	15470		19,32273	53	87	70	0,000665	28,32
		60%	18560		23,18228	63	111	87	0,000835	27,18
		70%	21650		27,04183	76	136	106	0,001025	25,9
		80%	24750		30,91387	92	167	129,5	0,00126	24,15

Tabela 106 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 25%RCA – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 25%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
25%RCA	CP2	-	393	7854	0,490875	0	5	2,5	0	-
		20%	6190		7,731589	18	29	23,5	0,0002	36,2
		30%	9280		11,59114	30	43	36,5	0,00033	33,64
		40%	12370		15,45069	51	61	56	0,000525	28,49
		50%	15470		19,32273	60	71	65,5	0,00062	30,37
		60%	18560		23,18228	83	93	88	0,000845	26,85
		70%	21650		27,04183	105	114	109,5	0,00106	25,05
		80%	24750		30,91387	131	142	136,5	0,00133	22,87

Tabela 107 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 25%RCA – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 25%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
25%RCA	CP3	-	393	7854	0,490875	2	6	4	0	-
		20%	6190		7,731589	30	24	27	0,000235	30,81
		30%	9280		11,59114	42	38	40	0,000365	30,41
		40%	12370		15,45069	50	55	52,5	0,00049	30,53
		50%	15470		19,32273	75	70	72,5	0,00069	27,29
		60%	18560		23,18228	93	89	91	0,000875	25,93
		70%	21650		27,04183	110	111	110,5	0,00107	24,81
		80%	24750		30,91387	142	140	141	0,001375	22,13

Tabela 108 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 50%RCA.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto 50%RCA				
Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	23490,00	234,90	2,99084	29,91
CP2 7 dias	23230,00	232,30	2,957735	29,58
CP3 7 dias	22550,00	225,50	2,871155	28,71
CP1 14 dias	25780,00	257,80	3,282412	32,82
CP2 14 dias	27780,00	277,80	3,537059	35,37
CP3 14 dias	27320,00	273,20	3,47849	34,78
CP1 28 dias	29480,00	294,80	3,75351	37,54
CP2 28 dias	23160,00	231,60	2,948823	29,49
CP3 28 dias	28360,00	283,60	3,610907	36,11

Tabela 109 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 50%RCA.

Valores médios de resistência à compressão do concreto 50%RCA nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
7 dias	29,40 MPa
14 dias	34,32 MPa
28 dias	36,83 MPa

Tabela 110 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto 50%RCA.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto 50%RCA					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
50%RCA - CP1	26/03/2019	12,1	12100	38,5155	3,85
50%RCA - CP2	26/03/2019	12,3	12300	39,15212	3,92
50%RCA - CP3	26/03/2019	12,2	12200	38,83381	3,88
Média :					3,88

Tabela 111 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 50%RCA – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 50%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
50%RCA	CP1	-	393	7877,6	0,489407	0	6	3	0	-
		20%	6214		7,738352	23	28	25,5	0,000225	32,22
		30%	9321		11,60753	30	47	38,5	0,000355	31,32
		40%	12428		15,4767	32	77	54,5	0,000515	29,1
		50%	15535		19,34588	35	105	70	0,00067	28,14
		60%	18642		23,21506	38	140	89	0,00086	26,43
		70%	21749		27,08423	42	171	106,5	0,001035	25,7
		80%	24856		30,95341	54	199	126,5	0,001235	24,67

Tabela 112 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 50%RCA – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 50%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
50%RCA	CP2	-	393	7822,6	0,489407	2	2	2	0	-
		20%	6214		7,738352	20	28	24	0,00021	34,52
		30%	9321		11,60753	29	47	38	0,00035	31,77
		40%	12428		15,4767	36	68	52	0,00049	30,59
		50%	15535		19,34588	41	95	68	0,00065	29,01
		60%	18642		23,21506	46	123	84,5	0,000815	27,88
		70%	21749		27,08423	52	157	104,5	0,001015	26,2
		80%	24856		30,95341	58	195	126,5	0,001235	24,67

Tabela 113 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 50%RCA – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 50%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
50%RCA	CP3	-	393	7948,5	0,489407	0	2	1	0	-
		20%	6214		7,738352	21	26	23,5	0,000205	35,36
		30%	9321		11,60753	33	42	37,5	0,000345	32,23
		40%	12428		15,4767	47	59	53	0,0005	29,97
		50%	15535		19,34588	61	77	69	0,00066	28,57
		60%	18642		23,21506	78	98	88	0,00085	26,74
		70%	21749		27,08423	97	121	109	0,00106	25,09
		80%	24856		30,95341	128	150	139	0,00136	22,4

Tabela 114 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 75%RCA.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto 75%RCA				
Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	28340,00	283,40	3,608361	36,08
CP2 7 dias	27860,00	278,60	3,547245	35,47
CP3 7 dias	28150,00	281,50	3,584169	35,84
CP1 14 dias	27420,00	274,20	3,491223	34,91
CP2 14 dias	30090,00	300,90	3,831178	38,31
CP3 14 dias	32480,00	324,80	4,135482	41,35
CP1 28 dias	32280,00	322,80	4,110017	41,1
CP2 28 dias	34650,00	346,50	4,411775	44,12
CP3 28 dias	35600,00	356,00	4,532733	45,33

Tabela 115 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 75%RCA.

Valores médios de resistência à compressão do concreto 50%RCA nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
7 dias	35,80 MPa
14 dias	38,19 MPa
28 dias	43,52 MPa

Tabela 116 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto 75%RCA.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto 75%RCA					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
75%RCA - CP1	26/03/2019	11,1	11100	35,3324	3,53
75%RCA - CP2	26/03/2019	11,2	11200	35,65071	3,57
75%RCA - CP3	26/03/2019	11,2	11200	35,65071	3,57
				Média : 3,56	

Tabela 117 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 75%RCA – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 75%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
75%RCA	CP1	-	393	7980,1	0,483115	0	4	2	0	-
		20%	7280		8,949308	24	30	27	0,00025	33,86
		30%	10920		13,42396	28	59	43,5	0,000415	31,18
		40%	14560		17,89862	30	87	58,5	0,000565	30,82
		50%	18200		22,37327	32	119	75,5	0,000735	29,78
		60%	21840		26,84792	35	153	94	0,00092	28,66
		70%	25480		31,32258	40	191	115,5	0,001135	27,17
		80%	29120		35,79723	50	226	138	0,00136	25,97

Tabela 118 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 75%RCA – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 75%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
75%RCA	CP2	-	393	7964,3	0,483115	7	0	3,5	0	-
		20%	7280		8,949308	33	27	30	0,00028	30,24
		30%	10920		13,42396	55	34	44,5	0,000425	30,45
		40%	14560		17,89862	80	41	60,5	0,000585	29,77
		50%	18200		22,37327	108	47	77,5	0,000755	28,99
		60%	21840		26,84792	139	54	96,5	0,000945	27,9
		70%	25480		31,32258	161	62	111,5	0,001095	28,16
		80%	29120		35,79723	205	82	143,5	0,001415	24,96

Tabela 119 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 75%RCA – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 75%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
75%RCA	CP3	-	393	7909,1	0,483115	2	2	2	0	-
		20%	7280		8,949308	30	28	29	0,00027	31,36
		30%	10920		13,42396	54	38	46	0,00044	29,41
		40%	14560		17,89862	75	46	60,5	0,000585	29,77
		50%	18200		22,37327	101	52	76,5	0,000745	29,38
		60%	21840		26,84792	127	64	95,5	0,000935	28,2
		70%	25480		31,32258	152	80	116	0,00114	27,05
		80%	29120		35,79723	187	97	142	0,0014	25,22

Tabela 120 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 100%RCA.

NBR 5739:2007 - Ensaio de compressão Concreto 100%RCA				
Corpo de prova	Força resistida		$f_{c,j}$	
	(Kg.f)	(kN)	(kN/cm ²)	(MPa)
CP1 7 dias	26480,00	264,80	3,371538	33,72
CP2 7 dias	27860,00	278,60	3,547245	35,47
CP3 7 dias	28140,00	281,40	3,582896	35,83
CP1 14 dias	30990,00	309,90	3,945769	39,46
CP2 14 dias	31140,00	311,40	3,964868	39,65
CP3 14 dias	29370,00	293,70	3,739505	37,4
CP1 28 dias	34520,00	345,20	4,395223	43,95
CP2 28 dias	34780,00	347,80	4,428327	44,28
CP3 28 dias	34600,00	346,00	4,405409	44,05

Tabela 121 – Média dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do concreto 100%RCA.

Valores médios de resistência à compressão do concreto 100%RCA nas idades avaliadas	
Idade do ensaio	$f_{c,j}$ médio
7 dias	35,80 MPa
14 dias	38,19 MPa
28 dias	43,52 MPa

Tabela 122 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto 100%RCA.

NBR 7222: 2011 Ensaio de resistência à tração diametral Concreto 100%RCA					
Modelo	Data do ensaio	Carga do ensaio		$f_{ct,sp}$	
		(tf)	(kgf)	kgf/cm ²	(MPa)
100%RCA - CP1	26/03/2019	14,7	14700	46,79155	4,68
100%RCA - CP2	26/03/2019	13,7	13700	43,60845	4,36
100%RCA - CP3	26/03/2019	15	15000	47,74648	4,77
Média :					4,60

Tabela 123 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 100%RCA – CP1.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 100%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
100%RCA	CP1	-	393	7980,1	0,483115	0	7	3,5	0	-
		20%	7655		9,410295	30	33	31,5	0,00028	31,88
		30%	11482		14,11483	48	50	49	0,000455	29,96
		40%	15310		18,82059	65	70	67,5	0,00064	28,65
		50%	19137		23,52512	86	90	88	0,000845	27,27
		60%	22965		28,23089	111	110	110,5	0,00107	25,93
		70%	26792		32,93542	139	133	136	0,001325	24,49
		80%	30620		37,64118	169	159	164	0,001605	23,15

Tabela 124 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 100%RCA – CP2.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 100%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
100%RCA	CP2	-	393	7964,3	0,483115	6	0	3	0	-
		20%	7655		9,410295	30	28	29	0,000255	35,01
		30%	11482		14,11483	51	42	46,5	0,00043	31,7
		40%	15310		18,82059	74	54	64	0,000605	30,31
		50%	19137		23,52512	99	68	83,5	0,0008	28,8
		60%	22965		28,23089	123	84	103,5	0,001	27,75
		70%	26792		32,93542	152	102	127	0,001235	26,28
		80%	30620		37,64118	187	125	156	0,001525	24,37

Tabela 125 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade do concreto 100%RCA – CP3.

Ensaio de módulo de elasticidade – Concreto 100%RCA										
Identificação	Espécime	Ruptura prevista	Carga de ensaio (kgf)	Área do CP (mm)	Tensão (MPa)	Deformação			Deformação específica	Módulo de Elasticidade secante (GPa)
						A	B	Média		
100%RCA	CP3	-	393	7909,1	0,483115	0	0	0	0	-
		20%	7655		9,410295	32	27	29,5	0,00026	34,34
		30%	11482		14,11483	52	35	43,5	0,0004	34,08
		40%	15310		18,82059	80	43	61,5	0,00058	31,62
		50%	19137		23,52512	110	50	80	0,000765	30,12
		60%	22965		28,23089	138	61	99,5	0,00096	28,9
		70%	26792		32,93542	167	77	122	0,001185	27,39
		80%	30620		37,64118	198	101	149,5	0,00146	25,45

Ar incorporado

Determinação do teor de ar incorporado do concreto C40-M1 de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
23,8	10	2380

8.2 - Rendimento

Massa de cimento em Kg (m _c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m _f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m _{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m _{g2})	Massa total de água em Kg (m _a)
28,43	48,34	51,18	0	9,95

Rendimento em m³ (R)**0,057941176**

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m _c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
28,43	0,057941176	490,6700508

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m _c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m _f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m _{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m _{g2})	Massa total de água em Kg (m _a)
28,43	48,34	51,18	0	9,95

Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2722	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_t)**0,056947257**

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V _t)	Índice de ar presente na mistura (I _a)
0,057941176	0,056947257	1,017453333

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I _a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,017453333	1,715393972

Determinação do teor de ar incorporado do concreto C40-M2 de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
23,7	10	2370

8.2 - Rendimento

Massa de cimento em Kg (m _c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m _f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m _{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m _{g2})	Massa total de água em Kg (m _a)
27,39	50,42	49,87	0	10,44

Rendimento em m³ (R)**0,058278481**

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m _c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,058278481	469,9847958

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m _c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m _f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m _{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m _{g2})	Massa total de água em Kg (m _a)
27,39	50,42	49,87	0	10,44

Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2722	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_t)**0,057448547**

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V _t)	Índice de ar presente na mistura (I _a)
0,058278481	0,057448547	1,01444656

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I _a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,01444656	1,424082918

Determinação do teor de ar incorporado do concreto 25%RCA de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
23,5	10	2350

8.2 - Redimento

Massa de cimento em Kg (m _c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m _f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m _{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m _{g2})	Massa total de água em Kg (m _a)
27,39	51,65	37,31	11,16	9,27
Rendimento em m ³ (R)				
0,058204255				

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m _c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,058204255	470,5841497

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m _c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m _f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m _{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m _{g2})	Massa total de água em Kg (m _a)
27,39	51,65	37,31	11,16	9,27
Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2660	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_t)

0,056343025

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V _t)	Índice de ar presente na mistura (I _a)
0,058204255	0,056343025	1,033033912

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I _a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,033033912	3,197756764

Determinação do teor de ar incorporado do concreto 50%RCA de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
21,9	10	2190

8.2 - Redimento

Massa de cimento em Kg (m _c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m _f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m _{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m _{g2})	Massa total de água em Kg (m _a)
27,39	51,65	24,88	22,33	9,21
Rendimento em m ³ (R)				
0,061853881				

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m _c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,061853881	442,817806

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m _c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m _f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m _{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m _{g2})	Massa total de água em Kg (m _a)
27,39	51,65	24,88	22,33	9,21
Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2660	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_t)

0,055915618

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V _t)	Índice de ar presente na mistura (I _a)
0,061853881	0,055915618	1,106200442

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I _a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,106200442	9,600470008

Determinação do teor de ar incorporado do concreto 75%RCA de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
23,9	10	2390

8.2 - Rendimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	50,66	12,44	33,49	10,14
Rendimento em m ³ (R)				
0,056117155				

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,056117155	488,0860424

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	50,66	12,44	33,49	10,14
Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2660	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_t)

0,056081955

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V_t)	Índice de ar presente na mistura (I_a)
0,056117155	0,056081955	1,000627655

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I_a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,000627655	0,062726153

Determinação do teor de ar incorporado do concreto 100%RCA de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
23,25	10	2325

8.2 - Rendimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	50,63	0	44,61	10,15
Rendimento em m ³ (R)				
0,057109677				

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,057109677	479,6034794

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	50,63	0	44,61	10,15
Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2660	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_t)

0,055690401

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V_t)	Índice de ar presente na mistura (I_a)
0,057109677	0,055690401	1,025485117

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I_a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,025485117	2,485176667

Determinação do teor de ar incorporado do concreto 25%RMA de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
22,85	10	2285

8.2 - Rendimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	51,65	37,31	6,19	10,98

Rendimento em m³ (R)

0,05843326

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,05843326	468,7398892

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	51,65	37,31	6,19	10,98

Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2722	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_b)

0,056136152

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V_b)	Índice de ar presente na mistura (I_a)
0,05843326	0,056136152	1,040920303

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I_a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,040920303	3,931165801

Determinação do teor de ar incorporado do concreto 50%RMA de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
22,2	10	2220

8.2 - Rendimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	51,65	24,88	12,38	12,63

Rendimento em m³ (R)

0,058076577

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,058076577	471,6187078

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	51,65	24,88	12,38	12,63

Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2722	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_b)

0,055498113

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V_b)	Índice de ar presente na mistura (I_a)
0,058076577	0,055498113	1,046460382

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I_a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,046460382	4,43976504

Determinação do teor de ar incorporado do concreto 75%RMA de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
22,05	10	2205

8.2 - Rendimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	50,72	12,44	18,56	15,2

Rendimento em m³ (R)

0,056376417

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,056376417	485,8414448

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	50,72	12,44	18,56	15,2

Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2722	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_t)

0,055407442

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V_t)	Índice de ar presente na mistura (I_a)
0,056376417	0,055407442	1,017488185

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I_a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,017488185	1,718760496

Determinação do teor de ar incorporado do concreto 100%RMA de acordo com a ABNT NBR 9833 (2008)

Capítulo 8 - Cálculos

8.1 - Massa específica

Massa do concreto em kg (m)	Volume do recipiente em dm ³ (V)	massa específica aparente em kg/m ³ (ρ_{ap})
21,55	10	2155

8.2 - Rendimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	50,68	0	24,75	16,89

Rendimento em m³ (R)

0,055549884

8.3 - Consumo de cimento

Massa de cimento em Kg (m_c)	Rendimento em m ³ (R)	Consumo de cimento em Kg/m ³ (C)
27,39	0,055549884	493,0703366

8.4 - Volume total dos componentes da betonada

Massa de cimento em Kg (m_c)	Massa total do agregado miúdo em Kg (m_f)	Massa total do agregado graúdo 1 em Kg (m_{g1})	Massa total do agregado graúdo 2 em Kg (m_{g2})	Massa total de água em Kg (m_a)
27,39	50,68	0	24,75	16,89

Massa específica do cimento em Kg/m ³ (ρ_c)	Massa específica do agregado miúdo em Kg/m ³ (ρ_f)	Massa específica do agregado graúdo 1 em Kg/m ³ (ρ_{g1})	Massa específica do agregado graúdo 2 em Kg/m ³ (ρ_{g2})	Massa específica da água em Kg/m ³ (ρ_a)
3140	2529	2722	2722	997,344631

Volume total dos componentes
da betonada em m³ (V_t)

0,054790019

8.5 - Índice de ar

Rendimento em m ³ (R)	Volume total dos componentes da betonada em m ³ (V_t)	Índice de ar presente na mistura (I_a)
0,055549884	0,054790019	1,013868679

8.6 - Teor de ar

Índice de ar presente na mistura (I_a)	Teor de ar incorporado no concreto em % (A)
1,013868679	1,367896929

Coeficiente de Fluência

C40-M1
Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R
Coeficiente dependente da idade de aplicação da carga

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064
Coeficiente dependente da umidade relativa	
Umidade (h)	0,5755 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,88
Coeficiente dependente da relação V/S	
S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88
Coeficiente dependente do slump do concreto	
s	10
$\gamma_{c,s}$	0,85
Coeficiente dependente do teor de agregado miúdo	
ψ	48,57 %
$\gamma_{c,\psi}$	0,996568
Coeficiente dependente do percentual de ar incorporado	
a	1,7 (%)
$\gamma_{c,a}$	1
Coeficiente de correção	
γ_c	0,65
Coeficiente de fluência	
ϕ^*	1,53

50%RCA
Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R
Coeficiente dependente da idade de aplicação

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064
Coeficiente dependente da umidade relativa	
Umidade (h)	0,5818 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,88
Coeficiente dependente da relação V/S	
S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88
Coeficiente dependente do slump do concreto	
s	190
$\gamma_{c,s}$	1,32
Coeficiente dependente do teor de agregado	
ψ	52,25 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,0054
Coeficiente dependente do percentual de ar	
a	9,6 (%)
$\gamma_{c,a}$	1,324
Coeficiente de correção	
γ_c	1,35
Coeficiente de fluência	
ϕ^*	3,17

C40-M2
Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R
Coeficiente dependente da idade de aplicação da carga

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064
Coeficiente dependente da umidade relativa	
Umidade (h)	0,6056 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,86
Coeficiente dependente da relação V/S	
S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88
Coeficiente dependente do slump do concreto	
s	25
$\gamma_{c,s}$	0,89
Coeficiente dependente do teor de agregado miúdo	
ψ	50,27 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,000648
Coeficiente dependente do percentual de ar incorporado	
a	1,4 (%)
$\gamma_{c,a}$	1
Coeficiente de correção	
γ_c	0,67
Coeficiente de fluência	
ϕ^*	1,57

75%RCA
Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R
Coeficiente dependente da idade de aplicação

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064
Coeficiente dependente da umidade relativa	
Umidade (h)	0,5978 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,87
Coeficiente dependente da relação V/S	
S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88
Coeficiente dependente do slump do concreto	
s	40
$\gamma_{c,s}$	0,93
Coeficiente dependente do teor de agregado	
ψ	52,45 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,00588
Coeficiente dependente do percentual de ar	
a	0,1 (%)
$\gamma_{c,a}$	1
Coeficiente de correção	
γ_c	0,70
Coeficiente de fluência	
ϕ^*	1,65

25%RCA
Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R
Coeficiente dependente da idade de aplicação da carga

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064
Coeficiente dependente da umidade relativa	
Umidade (h)	0,5818 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,88
Coeficiente dependente da relação V/S	
S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88
Coeficiente dependente do slump do concreto	
s	10
$\gamma_{c,s}$	0,85
Coeficiente dependente do teor de agregado miúdo	
ψ	51,59 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,003816
Coeficiente dependente do percentual de ar incorporado	
a	3,2 (%)
$\gamma_{c,a}$	1
Coeficiente de correção	
γ_c	0,65
Coeficiente de fluência	
ϕ^*	1,53

100%RCA
Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R
Coeficiente dependente da idade de aplicação

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064
Coeficiente dependente da umidade relativa	
Umidade (h)	0,6044 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,87
Coeficiente dependente da relação V/S	
S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88
Coeficiente dependente do slump do concreto	
s	40
$\gamma_{c,s}$	0,93
Coeficiente dependente do teor de agregado	
ψ	53,16 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,007584
Coeficiente dependente do percentual de ar	
a	2,5 (%)
$\gamma_{c,a}$	1
Coeficiente de correção	
γ_c	0,70
Coeficiente de fluência	
ϕ^*	1,65

25%RMA

Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R

Coeficiente dependente da idade de aplicação

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064

Coeficiente dependente da umidade relativa

Umidade (h)	0,5855 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,88

Coeficiente dependente da relação V/S

S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88

Coeficiente dependente do slump do concreto

s	10
$\gamma_{c,s}$	0,85

Coeficiente dependente do teor de agregado

ψ	54,28 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,010272

Coeficiente dependente do percentual de ar

a	3,9 (%)
$\gamma_{c,a}$	1

Coeficiente de correção

γ_c	0,65
------------	------

Coeficiente de fluência

ϕ^*	1,53
----------	------

100%RMA

Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R

Coeficiente dependente da idade de aplicação

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064

Coeficiente dependente da umidade relativa

Umidade (h)	0,61 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,86

Coeficiente dependente da relação V/S

S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88

Coeficiente dependente do slump do concreto

s	40
$\gamma_{c,s}$	0,93

Coeficiente dependente do teor de agregado

ψ	67,19 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,041256

Coeficiente dependente do percentual de ar

a	1,4 (%)
$\gamma_{c,a}$	1

Coeficiente de correção

γ_c	0,72
------------	------

Coeficiente de fluência

ϕ^*	1,69
----------	------

50%RMA

Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R

Coeficiente dependente da idade de aplicação

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064

Coeficiente dependente da umidade relativa

Umidade (h)	0,567 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,89

Coeficiente dependente da relação V/S

S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88

Coeficiente dependente do slump do concreto

s	70
$\gamma_{c,s}$	1,00

Coeficiente dependente do teor de agregado

ψ	58,09 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,019416

Coeficiente dependente do percentual de ar

a	4,4 (%)
$\gamma_{c,a}$	1

Coeficiente de correção

γ_c	0,79
------------	------

Coeficiente de fluência

ϕ^*	1,86
----------	------

75%RMA

Cálculo do coeficiente de fluência de acordo com o ACI 209.2R

Coeficiente dependente da idade de aplicação

t0	7 dias
$\gamma_{c,t0}$	0,993547064

Coeficiente dependente da umidade relativa

Umidade (h)	0,595 (dec.)
$\gamma_{c,RH}$	0,87

Coeficiente dependente da relação V/S

S	1,00E+07 mm ²
V	6,00E+08 mm ³
$\gamma_{c,vs}$	0,88

Coeficiente dependente do slump do concreto

s	40
$\gamma_{c,s}$	0,93

Coeficiente dependente do teor de agregado

ψ	62,07 %
$\gamma_{c,\psi}$	1,028968

Coeficiente dependente do percentual de ar

a	1,7 (%)
$\gamma_{c,a}$	1

Coeficiente de correção

γ_c	0,72
------------	------

Coeficiente de fluência

ϕ^*	1,69
----------	------

ANEXO B

Cálculo da abertura da fissura usando os dados reais

Tabela 126 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração aos 118 dias na laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150 mm.

Retração total - 118 dias - ϕ de 10,0mm com espaçamento de 150 mm										
Concreto	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	φ^*	$\varepsilon_{tot.}$ ($\mu\varepsilon$)	A_s (mm ² /m)	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	3,25	26,39	1,53	-614,92	471,24	410811	500	-	2	1,57
C40-M2	3,52	32,02	1,57	-570,29	471,24	394651	500	-	2	1,5
25%RCA	3,42	31,63	1,53	-538,68	471,24	371673	500	-	2	1,37
50%RCA	3,49	31,77	3,17	-710,29	471,24	416125	500	-	2	1,7
75%RCA	3,2	30,35	1,65	-660,48	471,24	307803	500	-	3	1,84
100%RCA	4,14	31,91	1,65	-645,81	471,24	427402	500	-	2	1,81
25%RMA	3,26	28,99	1,53	-577,28	471,24	394314	500	-	2	1,47
50%RMA	2,87	27,82	1,86	-663,94	471,24	301443	500	-	3	1,73
75%RMA	2,55	22,5	1,69	-716,68	471,24	326438	500	-	3	1,82
100%RMA	2,19	21,02	1,69	-858,47	471,24	231925	492	1000	5	0,66

Tabela 127 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração aos 118 dias na laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 100 mm.

Retração total - 118 dias - ϕ de 10,0mm com espaçamento de 100 mm										
Concreto	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	φ^*	$\varepsilon_{tot.}$ ($\mu\varepsilon$)	A_s (mm ² /m)	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	3,25	26,39	1,53	-614,92	706,86	414114	500	-	4	1,38
C40-M2	3,52	32,02	1,57	-570,29	706,86	400915	500	-	4	1,38
25%RCA	3,42	31,63	1,53	-538,68	706,86	377315	500	-	4	1,26
50%RCA	3,49	31,77	3,17	-710,29	706,86	404793	500	-	4	1,37
75%RCA	3,2	30,35	1,65	-660,48	706,86	385910	500	-	5	1,68
100%RCA	4,14	31,91	1,65	-645,81	706,86	429544	500	-	4	1,67
25%RMA	3,26	28,99	1,53	-577,28	706,86	399401	500	-	4	1,31
50%RMA	2,87	27,82	1,86	-663,94	706,86	302942	429	833,3	6	0,38
75%RMA	2,55	22,5	1,69	-716,68	706,86	272306	385	714,3	7	0,36
100%RMA	2,19	21,02	1,69	-858,47	706,86	227967	323	500	10	0,33

Tabela 128 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração aos 118 dias na laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 75 mm.

Retração total - 118 dias - ϕ de 10,0mm com espaçamento de 75 mm										
Concreto	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	φ^*	$\varepsilon_{tot.}$ ($\mu\varepsilon$)	A_s (mm ² /m)	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	3,25	26,39	1,53	-614,92	863,94	384911	446	833,3	6	0,31
C40-M2	3,52	32,02	1,57	-570,29	863,94	460017	500	-	5	1,24
25%RCA	3,42	31,63	1,53	-538,68	863,94	432675	500	-	5	1,12
50%RCA	3,49	31,77	3,17	-710,29	863,94	452842	500	-	5	1,11
75%RCA	3,2	30,35	1,65	-660,48	863,94	390113	452	714,3	7	0,31
100%RCA	4,14	31,91	1,65	-645,81	863,94	489863	500	-	5	1,52
25%RMA	3,26	28,99	1,53	-577,28	863,94	371792	430	833,3	6	0,3
50%RMA	2,87	27,82	1,86	-663,94	863,94	322630	373	625	8	0,28
75%RMA	2,55	22,5	1,69	-716,68	863,94	265212	307	500	10	0,25
100%RMA	2,19	21,02	1,69	-858,47	863,94	202999	235	333,3	15	0,23

Tabela 129 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração aos 118 dias na laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 50 mm.

Retração total - 118 dias - ϕ de 10,0mm com espaçamento de 50 mm										
Concreto	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	ϕ^*	$\epsilon_{tot.}$ ($\mu\epsilon$)	A_s (mm ² /m)	$N(\infty)$ (N)	$\sigma^*_{s,2}$ (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	3,25	26,39	1,53	-614,92	1256,64	359460	286	416,7	12	0,16
C40-M2	3,52	32,02	1,57	-570,29	1256,64	434775	346	500	10	0,17
25%RCA	3,42	31,63	1,53	-538,68	1256,64	408352	325	500	10	0,16
50%RCA	3,49	31,77	3,17	-710,29	1256,64	408543	325	500	10	0,17
75%RCA	3,2	30,35	1,65	-660,48	1256,64	365036	290	357,1	14	0,16
100%RCA	4,14	31,91	1,65	-645,81	1256,64	518387	413	555,6	9	0,2
25%RMA	3,26	28,99	1,53	-577,28	1256,64	386536	308	454,5	11	0,16
50%RMA	2,87	27,82	1,86	-663,94	1256,64	297085	236	312,5	16	0,14
75%RMA	2,55	22,5	1,69	-716,68	1256,64	257195	205	263,2	19	0,13
100%RMA	2,19	21,02	1,69	-858,47	1256,64	168037	134	166,7	30	0,12

Tabela 130 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração aos 140 dias na laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150 mm.

Retração total - 140 dias - ϕ de 10,0mm com espaçamento de 150 mm										
Concreto	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	φ^*	$\varepsilon_{tot.}$ ($\mu\varepsilon$)	As (mm ² /m)	N(∞) (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	3,25	26,39	1,53	-623,2	471,24	419294	500	-	2	1,6
C40-M2	3,52	32,02	1,57	-615,4	471,24	440676	500	-	2	1,71
25%RCA	3,42	31,63	1,53	-568,7	471,24	402312	500	-	2	1,51
50%RCA	3,49	31,77	3,17	-738,7	471,24	445132	500	-	2	1,82
75%RCA	3,2	30,35	1,65	-667,6	471,24	312413	500	-	3	1,88
100%RCA	4,14	31,91	1,65	-635,1	471,24	416523	500	-	2	1,77
25%RMA	3,26	28,99	1,53	-626,0	471,24	443948	500	-	2	1,69
50%RMA	2,87	27,82	1,86	-697,1	471,24	322940	500	-	3	1,88
75%RMA	2,55	22,5	1,69	-746,3	471,24	246683	500	-	4	1,96
100%RMA	2,19	21,02	1,69	-916,6	471,24	252352	500	-	5	2,64

Tabela 131 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração aos 140 dias na laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 100 mm.

Retração total - 140 dias - ϕ de 10,0mm com espaçamento de 100 mm										
Concreto	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	φ^*	$\varepsilon_{tot.}$ ($\mu\varepsilon$)	As (mm ² /m)	N(∞) (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	3,25	26,39	1,53	-623,2	706,86	423379	500	-	4	1,41
C40-M2	3,52	32,02	1,57	-615,4	706,86	451186	500	-	4	1,58
25%RCA	3,42	31,63	1,53	-568,7	706,86	410781	500	-	4	1,39
50%RCA	3,49	31,77	3,17	-738,7	706,86	436477	500	-	4	1,5
75%RCA	3,2	30,35	1,65	-667,6	706,86	392043	500	-	5	1,72
100%RCA	4,14	31,91	1,65	-635,1	706,86	417661	500	-	4	1,62
25%RMA	3,26	28,99	1,53	-626,0	706,86	351375	497	1000	5	0,42
50%RMA	2,87	27,82	1,86	-697,1	706,86	325999	461	833,3	6	0,39
75%RMA	2,55	22,5	1,69	-746,3	706,86	289378	409	714,3	7	0,37
100%RMA	2,19	21,02	1,69	-916,6	706,86	217437	308	454,5	11	0,33

Tabela 132 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração aos 140 dias na laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 75 mm.

Retração total - 140 dias - ϕ de 10,0mm com espaçamento de 75 mm										
Concreto	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	φ^*	$\varepsilon_{tot.}$ ($\mu\varepsilon$)	As (mm ² /m)	N(∞) (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	3,25	26,39	1,53	-623,2	863,94	393883	456	833,3	6	0,31
C40-M2	3,52	32,02	1,57	-615,4	863,94	422056	489	833,3	6	0,33
25%RCA	3,42	31,63	1,53	-568,7	863,94	383590	444	833,3	6	0,31
50%RCA	3,49	31,77	3,17	-738,7	863,94	398234	461	833,3	6	0,32
75%RCA	3,2	30,35	1,65	-667,6	863,94	396510	459	714,3	7	0,31
100%RCA	4,14	31,91	1,65	-635,1	863,94	475687	500	-	5	1,47
25%RMA	3,26	28,99	1,53	-626,0	863,94	353964	410	714,3	7	0,3
50%RMA	2,87	27,82	1,86	-697,1	863,94	300622	348	555,6	9	0,27
75%RMA	2,55	22,5	1,69	-746,3	863,94	282347	327	500	10	0,26
100%RMA	2,19	21,02	1,69	-916,6	863,94	200858	232	312,5	16	0,23

Tabela 133 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração aos 118 dias na laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 50 mm.

Retração total - 140 dias - ϕ de 10,0mm com espaçamento de 50 mm										
Concreto	f_{ctm} (MPa)	E_c (GPa)	φ^*	$\epsilon_{tot.}$ ($\mu\epsilon$)	A_s (mm ² /m)	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
C40-M1	3,25	26,39	1,53	-623,2	1256,64	368410	293	416,7	12	0,16
C40-M2	3,52	32,02	1,57	-615,4	1256,64	397293	316	416,7	12	0,17
25%RCA	3,42	31,63	1,53	-568,7	1256,64	400223	318	454,5	11	0,16
50%RCA	3,49	31,77	3,17	-738,7	1256,64	398480	317	454,5	11	0,18
75%RCA	3,2	30,35	1,65	-667,6	1256,64	371336	295	357,1	14	0,16
100%RCA	4,14	31,91	1,65	-635,1	1256,64	502189	400	555,6	9	0,2
25%RMA	3,26	28,99	1,53	-626,0	1256,64	361974	288	384,6	13	0,16
50%RMA	2,87	27,82	1,86	-697,1	1256,64	296434	236	294,1	17	0,14
75%RMA	2,55	22,5	1,69	-746,3	1256,64	254985	203	250	20	0,14
100%RMA	2,19	21,02	1,69	-916,6	1256,64	152472	121	151,5	33	0,12

Cálculo da abertura da fissura usando as regressões lineares.

Tabela 134 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto C40-M1, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto C40-M1									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-662,37	10	150	471,2	291978	500	-	3	1,78
		10	100	706,9	361710	500	-	5	1,59
		10	75	863,9	363802	421	714,3	7	0,31
		10	50	1256,6	371549	296	384,6	13	0,16
150	-760,75	10	150	471,2	355759	500	-	3	2,22
		10	100	706,9	359952	500	-	6	2,03
		10	75	863,9	384914	446	625	8	0,32
		10	50	1256,6	357094	284	312,5	16	0,17
500	-1105,97	10	150	471,2	314039	500	-	5	3,78
		10	100	706,9	359331	500	-	9	3,56
		10	75	863,9	308187	357	357,1	14	0,32
		10	50	1256,6	261932	208	178,6	28	0,17

Tabela 135 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto C40-M2, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto C40-M2									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-680,66	10	150	471,2	320617	500	-	3	2
		10	100	706,9	402897	500	-	5	1,86
		10	75	863,9	407600	472	714,3	7	0,33
		10	50	1256,6	419315	334	384,6	13	0,18
150	-779,04	10	150	471,2	384397	500	-	3	2,45
		10	100	706,9	393149	500	-	6	2,31
		10	75	863,9	422185	489	625	8	0,34
		10	50	1256,6	393591	313	312,5	16	0,18
500	-1124,27	10	150	471,2	434055	500	-	4	4,02
		10	100	706,9	379217	500	-	9	3,87
		10	75	863,9	362869	420	384,6	13	0,36
		10	50	1256,6	295924	235	185,2	27	0,18

Tabela 136 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto 25%RCA, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto com 25% de RCA									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-682	10	150	471,2	325079	500	-	3	2,01
		10	100	706,9	409540	500	-	5	1,87
		10	75	863,9	414946	480	714,3	7	0,33
		10	50	1256,6	389589	310	357,1	14	0,17
150	-780,39	10	150	471,2	388866	500	-	3	2,45
		10	100	706,9	398510	500	-	6	2,32
		10	75	863,9	370096	428	555,6	9	0,32
		10	50	1256,6	368779	293	294,1	17	0,17
500	-1125,61	10	150	471,2	331978	500	-	5	4,03
		10	100	706,9	382423	500	-	9	3,88
		10	75	863,9	328851	381	357,1	14	0,34
		10	50	1256,6	280357	223	178,6	28	0,17

Tabela 137 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto 50%RCA, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto com 50% de RCA									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-696,68	10	150	471,2	402248	500	-	2	1,64
		10	100	706,9	389636	500	-	4	1,32
		10	75	863,9	434759	500	-	5	1,05
		10	50	1256,6	390290	311	500	10	0,18
150	-795,07	10	150	471,2	319558	500	-	3	2,07
		10	100	706,9	386694	500	-	5	1,74
		10	75	863,9	382906	443	714,3	7	0,33
		10	50	1256,6	379143	302	384,6	13	0,18
500	-1140,29	10	150	471,2	387778	500	-	4	3,6
		10	100	706,9	385748	500	-	8	3,23
		10	75	863,9	349039	404	416,7	12	0,35
		10	50	1256,6	324009	258	217,4	23	0,19

Tabela 138 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto 75%RCA, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto com 75% de RCA									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-708,89	10	150	471,2	339188	500	-	3	2,06
		10	100	706,9	344712	488	833,3	6	0,42
		10	75	863,9	369047	427	625	8	0,31
		10	50	1256,6	342481	273	312,5	16	0,16
150	-807,27	10	150	471,2	402969	500	-	3	2,51
		10	100	706,9	342101	484	714,3	7	0,43
		10	75	863,9	383850	444	555,6	9	0,33
		10	50	1256,6	327869	261	263,2	19	0,16
500	-1152,5	10	150	471,2	339623	500	-	5	4,08
		10	100	706,9	338778	479	500	10	0,48
		10	75	863,9	303323	351	333,3	15	0,33
		10	50	1256,6	252654	201	166,7	30	0,17

Tabela 139 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto 100%RCA, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto com 100% de RCA									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-748,83	10	150	471,2	532439	500	-	2	2,28
		10	100	706,9	544274	500	-	4	2,14
		10	75	863,9	508699	500	-	6	1,98
		10	50	1256,6	478158	381	416,7	12	0,2
150	-847,22	10	150	471,2	402341	500	-	3	2,73
		10	100	706,9	506478	500	-	5	2,58
		10	75	863,9	512902	500	-	7	2,42
		10	50	1256,6	439912	350	333,3	15	0,2
500	-1192,44	10	150	471,2	446856	500	-	4	4,3
		10	100	706,9	453252	500	-	8	4,13
		10	75	863,9	414467	480	416,7	12	0,4
		10	50	1256,6	391703	312	217,4	23	0,21

Tabela 140 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto 25%RMA, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto com 25% de RMA									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-630,48	10	150	471,2	285216	500	-	3	1,71
		10	100	706,9	355274	500	-	5	1,55
		10	75	863,9	358031	414	714,3	7	0,3
		10	50	1256,6	366375	292	384,6	13	0,16
150	-728,86	10	150	471,2	348997	500	-	3	2,16
		10	100	706,9	354764	500	-	6	1,99
		10	75	863,9	380002	440	625	8	0,32
		10	50	1256,6	353140	281	312,5	16	0,16
500	-1074,09	10	150	471,2	310378	500	-	5	3,72
		10	100	706,9	356228	500	-	9	3,54
		10	75	863,9	305859	354	357,1	14	0,32
		10	50	1256,6	260249	207	178,6	28	0,16

Tabela 141 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto 50%RMA, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto com 50% de RMA									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-634,15	10	150	471,2	282129	500	-	3	1,59
		10	100	706,9	350150	495	1000	5	0,4
		10	75	863,9	352321	408	714,3	7	0,28
		10	50	1256,6	327464	261	357,1	14	0,15
150	-732,54	10	150	471,2	345917	500	-	3	2,04
		10	100	706,9	350641	496	833,3	6	0,41
		10	75	863,9	324060	375	555,6	9	0,28
		10	50	1256,6	296374	236	277,8	18	0,15
500	-1077,76	10	150	471,2	308706	500	-	5	3,59
		10	100	706,9	267600	379	454,5	11	0,41
		10	75	863,9	273694	317	333,3	15	0,3
		10	50	1256,6	213349	170	161,3	31	0,15

Tabela 142 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto 75%RMA, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto com 75% de RMA									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-608,4	10	150	471,2	256598	500	-	3	1,34
		10	100	706,9	315098	446	1000	5	0,35
		10	75	863,9	316020	366	714,3	7	0,26
		10	50	1256,6	293028	233	357,1	14	0,13
150	-706,78	10	150	471,2	320379	500	-	3	1,78
		10	100	706,9	266963	378	714,3	7	0,35
		10	75	863,9	297368	344	555,6	9	0,26
		10	50	1256,6	251777	200	263,2	19	0,13
500	-1052,01	10	150	471,2	294872	500	-	5	3,32
		10	100	706,9	254800	360	454,5	11	0,38
		10	75	863,9	235608	273	312,5	16	0,27
		10	50	1256,6	179047	142	151,5	33	0,14

Tabela 143 – Cálculo da abertura de fissuras decorrentes da retração do concreto 100%RMA, utilizando os valores obtidos pelas regressões lineares, para uma laje contendo barra de aço CA-50 de 10,00 diâmetro e espaçadas a 150, 100, 75 e 50 mm .

Concreto com 100% de RMA									
Idade (dias)	Magnitude da retração ($\mu\epsilon$)	Diâmetro da barra (mm)	Espaçamento entre barras (mm)	Área de aço mm^2/m	$N(\infty)$ (N)	σ^*_{s2} (MPa)	s (mm)	m	w (mm)
100	-626,99	10	150	471,2	277953	500	-	3	1,36
		10	100	706,9	230681	326	714,3	7	0,31
		10	75	863,9	224240	260	500	10	0,22
		10	50	1256,6	216963	173	263,2	19	0,12
150	-725,38	10	150	471,2	243885	500	-	4	1,79
		10	100	706,9	242598	343	625	8	0,32
		10	75	863,9	220245	255	416,7	12	0,22
		10	50	1256,6	192961	154	208,3	24	0,12
500	-1070,6	10	150	471,2	195397	415	714,3	7	0,65
		10	100	706,9	183379	259	357,1	14	0,33
		10	75	863,9	168461	195	250	20	0,23
		10	50	1256,6	111495	89	122	41	0,12