



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

VICTOR MARCELO ESTOLANO DE LIMA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS
ORIUNDOS DE RESÍDUOS DE UMA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS
DE CONCRETO**

Recife, PE

2017



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

VICTOR MARCELO ESTOLANO DE LIMA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS
ORIUNDOS DE RESÍDUOS DE UMA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS
DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Construção Civil

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Stela Fucale Sukar

Co-orientador: Prof. Dr. José Orlando Vieira Filho

Recife, PE

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

L732a

Lima, Victor Marcelo Estolano de
Análise das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos da indústria de pré-fabricados de concreto/ Victor Marcelo Estolano de Lima. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2017.
216 f.: il.

Orientadora: Dra. Stela Fucale Sukar
Co-orientador: Dr. José Orlando Vieira Filho
Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.

1. Resíduo de concreto 2. Pré-fabricado de concreto 3. Agregado reciclado 4. Concreto reciclado. I. Construção civil – Dissertação II. Sukar, Stela Fucale (orient.) III. Vieira Filho, José Orlando (co-orient.) IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. V. Título.

CDD: 628.4

VICTOR MARCELO ESTOLANO DE LIMA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS
ORIUNDOS DE RESÍDUOS DE UMA INDÚSTRIA DE PRÉ-
FABRICADOS DE CONCRETO**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora:



Prof. Dra. Stela Fucale Sukar
Universidade de Pernambuco

Co-orientador



Prof. Dr. José Orlando Vieira Filho
Universidade Federal de Pernambuco

Examinadores:



Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva
Universidade Católica de Pernambuco

Recife, PE
2017

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais (Maria Cristina e
Marcelo), à minha noiva (Amanda)
e à minha irmã (Vanessa)*

AGRADECIMENTOS

À professora Stela Fucale pela oportunidade, pela orientação, pela confiança depositada em mim, por todos os ensinamentos transmitidos, e pela forma respeitosa na qual se deu nossa relação entre orientador e orientando.

Ao professor José Orlando pela orientação dada e pelo auxílio dado na indústria onde foi realizada a pesquisa.

Ao professor Ângelo Just pela viabilização da realização de ensaios na TECOMAT e pelas críticas construtivas ao longo do mestrado.

Ao professor Alexandre Gusmão, chefe do grupo de pesquisa, que participou do processo de viabilização da pesquisa na indústria.

Aos professores do PEC pelos ensinamentos transmitidos nas disciplinas durante o mestrado, em especial ao professor Willames, pela contribuição estatística dada na reta final da dissertação

Aos alunos de graduação Diego Oliveira e Yuri Alencar, que deram um suporte fundamental em todas as etapas da pesquisa.

Aos funcionários da indústria Thomaz e Vladimir, pelo apoio fundamental na confecção dos concretos e a Felipe Salomão, que foi o principal elo entre minha pessoa e a diretoria.

Aos funcionários da TECOMAT e da UNICAP, pelo auxílio nos procedimentos realizados nos locais.

À CAPES, pelo auxílio financeiro dado durante a pesquisa.

A Dona Lúcia, por todo o suporte dado ao longo do mestrado.

Ao laboratorista Fábio Ferreira, por todo o apoio na realização dos ensaios na POLI.

À minha noiva, ao meu pai, a Yuri Alencar e a Felipe Salomão pelo auxílio no transporte de materiais durante a pesquisa.

Aos meus pais, à minha noiva, à minha irmã, à minha sogra Nalva, ao meu falecido sogro Manoel e ao meu cunhado Ramon, que sempre acreditaram em meu potencial me apoiaram de forma incondicional.

A Suenne Pinho, que foi uma grande incentivadora para realização do curso de mestrado.

Aos meus amigos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

LIMA, Victor Marcelo Estolano de. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de uma fábrica de pré-fabricados de concreto**. Recife: UPE, 2017. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

RESUMO

Esta pesquisa tem o objetivo de realizar uma análise das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto de uma indústria de pré-fabricados de concreto. Os resíduos gerados na indústria foram beneficiados por um britador e em seguida, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados naturais e reciclados, tais como: análise granulométrica, teor de material pulverulento, massa específica, absorção de água e abrasão Los Angeles. Em seguida, foi realizada uma dosagem experimental de concretos com estes elementos, partindo de dois traços utilizados pela indústria, e os concretos resultantes das substituições pelos agregados reciclados foram separados em dois grupos: C1 e C2. Seus traços originais foram chamados respectivamente de C1-ref e C2-ref. Foram estabelecidas substituições de 30% e 50% para os concretos do grupo C1, chamados de C1-30 e C1-50, respectivamente, e substituição de 100% para o concreto do grupo C2, nomeado C2-100. O abatimento de tronco de cone foi fixado em 230 ± 20 mm para os concretos do grupo C1, e zero para os concretos do grupo C2. O teor de argamassa foi fixado em $\alpha_1 = 0,54$ para os concretos C1 e $\alpha_2 = 0,53$ para os do tipo C2. Houve uma pequena variação da relação a/c nos concretos do grupo C1, e uma variação significativa entre os concretos do grupo C2. Foram realizados ensaios com o concreto fresco: massa unitária e abatimento de tronco de cone; e com os corpos de prova de concreto, como: resistência à compressão simples, esclerometria, absorção de água e massa específica, módulo de elasticidade estático, resistência à tração por tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico. No grupo C1, os resultados mostraram, aos 28 dias, que o concreto C1-0 apresentou o maior valor de resistência à compressão simples, em comparação com os concretos C1-30 e C1-50. Aos 105 dias de cura, entretanto, o C1-30 apresentou uma resistência 87,13 MPa, superando os concretos C1-ref e C1-50. No grupo C2, aos 28 dias, o concreto C2-100 obteve uma resistência à compressão simples 28% menor em comparação com o C2-ref. Aos 105 dias, a tendência continuou e a resistência do C2-ref foi 36,61% superior ao C2-100. No ensaio de absorção, observou-se que a absorção à água aumentou à medida que o teor de substituição de agregados naturais pelos reciclados cresceu. O concreto C2-100 chegou a ter uma absorção 3,58% maior que o C2-ref. A mesma tendência aconteceu nos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e estático, que diminuiu com o aumento do percentual de agregados reciclados. Com relação ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, o concreto C1-30 obteve um valor de 6,09 MPa, superando os 6,03 MPa do C1-ref e 5,10 MPa do C1-50. Neste ensaio, o concreto C2-ref obteve uma resistência de 4,97 MPa e o C2-100 4,75 MPa. Realizando uma análise de semelhança estatística (ANOVA e teste T para médias) entre as amostras de resistência à compressão simples, verificou-se que algumas amostras apresentaram semelhanças estatísticas. Concluiu-se que a incorporação de agregado reciclado ao concreto não diminuiu sua resistência à compressão, que é afetada apenas pela relação a/c. Outras propriedades como módulo de elasticidade, massa específica e absorção, devido ao aumento do número de vazios, podem sofrer variação com o aumento da quantidade de agregados reciclados.

Palavras-chave: Resíduos de concreto. Pré-fabricados de concreto. Agregado reciclado. Concreto reciclado.

LIMA, Victor Marcelo Estolano de. **Evaluation of physical and mechanical properties of concrete made with recycled aggregates from concrete precast industry rejects**. Recife: UPE, 2017. Thesis (Master). Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

ABSTRACT

This research aims to perform an assessment of the physical and mechanical properties of concrete produced with concrete recycled aggregates from a precast concrete industry. Waste generated in the industry was benefited by a crusher and tests were done with the natural and recycled aggregates, such as: size grading, powder content, density, water absorption and Los Angeles wear. Then an experimental dosing of concrete with these elements was carried out, starting from two mixes used by the industry, and the concretes resulting from the substitutions by the recycled aggregates were separated into two groups: C1 and C2. 0, 30 and 50% substitutions have been established for the C1 group, called C1-ref, C1-30 and C1-50, respectively, and substitutions of 0 and 100% for the C2, called C2-ref and C2-100, respectively. The slump test was set at 230 ± 20 mm for the mixes of group C1, and zero for the mixes of group C2. The mortar content was set at $\alpha_1 = 0.54$ for group C1 and $\alpha_2 = 0.53$ for group C2. There was a small difference of w/c ratio between C1 mixes, but it was found a significant difference between C2 mixes. Tests were done on fresh concrete: density and slump test; and with hardened concrete, such as: axial compression strength, sclerometry, water absorption and density, modulus of elasticity by compression, tensile strength by diametral compression and dynamic modulus of elasticity. In the group C1, the results showed at 28 cure days that the C1-ref mix presented the highest value of resistance to the axial compression, comparing with the mixes C1-30 and C1-50. At 105 cure days, however, the C1-30 had a resistance of 87.13 MPa, surpassing the concrete C1-ref and C1-50. In group C2, at 28 cure days, C2-100 concrete obtained a 28% lower compression strength compared to C2-ref. The trend continued and C2-ref resistance was 36.61% higher than C2-100 at 105 cure days. At the absorption test, it was observed that the water absorption increased as the recycled content of natural aggregates was increased. C2-100 had a 3.58% higher absorption than C2-ref. The same trend occurred in the dynamic and static modulus of elasticity, which decreased with the increase in the ratio recycled aggregates replacement ratio. With regard to the diametral compression tensile strength test, C1-30 obtained a value of 6.09 MPa, exceeding 6.03 MPa of C1-ref and 5.10 MPa of C1-50. In this test, the C2-ref concrete obtained a strength of 4.97 MPa and the C2-100 4.75 MPa. A statistical similarity analysis (ANOVA and T-test for averages) among the samples of simple compressive strength showed that some samples presented statistical similarities. It was concluded that the incorporation of recycled aggregate does not decrease its compression strength, which is affected only by the w/c ratio. Other properties such as modulus of elasticity, dry density and absorption may vary with increasing amount of recycled aggregates due to the increase of the concrete porosity.

Keywords: Concrete waste. Concrete precast. Recycled aggregate. Recycled concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de produção em uma indústria de pré-fabricados.....	25
Figura 2 - Máquina extrusora.....	26
Figura 3 – Composição granulométrica de agregados finos natural e reciclado.	29
Figura 4 – Composição granulométrica do agregado reciclado.	30
Figura 5 – Composição granulométrica do agregado reciclado.	31
Figura 6 – Abatimento das famílias de concreto produzidas.	36
Figura 7 – Módulos de elasticidade para concretos com agregados reciclados.	40
Figura 8 - Linearidade da queda dos valores de módulo de elasticidade e velocidade da onda em relação à quantidade de agregados reciclados no concreto.....	41
Figura 9 – Etapas do Programa Experimental.....	44
Figura 10 – (a) Centrifugação de estaca; (b) Lajes alveolares protendidas.	45
Figura 11 – <i>Layout</i> da fábrica.....	46
Figura 12 – Sobra de concreto pelo processo de extrusão (laje alveolar).....	47
Figura 13 – (a) Trituração das peças; (b) Resíduos após a trituração.....	47
Figura 14 - Geração de resíduos da indústria de pré-fabricados.....	49
Figuras 15 a e b – Pilhas de resíduos.....	50
Figura 16 – Britador utilizado na pesquisa.....	50
Figura 17 – (a) Areia fina reciclada; (b) Pedrisco reciclado.....	50
Figura 18 – Peneiramento de agregado reciclado.....	51
Figura 19 – (a) Pesagem dos sacos; (b) armazenagem dos agregados reciclados.	52
Figura 20 – Agregados no interior do laboratório.....	53
Figura 21 – Conjunto de peneiras em vibrador mecânico.....	56
Figura 22 – (a) e (b) Nivelamento do agregado no recipiente; (c) Pesagem do conjunto agregado e recipiente.	57
Figura 23 – (a) Agregados submersos em água; (b) Secagem dos agregados com secador; (c) Verificação da condição saturada superfície seca.....	58
Figura 24 – (a) Agregados saturados; (b) Agregados colocados em cesto ligado à balança hidrostática.	59
Figura 25 – (a) Tambor da máquina de abrasão; (b) Agregados após o ensaio; (c) Lavagem dos agregados na peneira de malha #1,70 mm.....	60
Figura 26 – Concreto com 100% de agregados finos reciclados.....	62
Figura 27 – (a;b) Retirada do molde; (c) Medição do abatimento de tronco de cone.....	64

Figura 28 – Pesagem do concreto fresco no molde para determinação da massa unitária	65
Figura 29 – (a;b) Moldagem dos corpos de prova cilíndricos; (c) Tanque de cura.....	66
Figura 30 – Compactação do concreto seco	68
Figura 31 - Rompimento do corpo de prova.....	68
Figura 32 – Aplicação do esclerômetro no corpo de prova.....	68
Figura 33 - Pontos demarcados no corpo de prova para o ensaio de esclerometria.....	69
Figura 34 – (a) Demarcação nos corpos de prova; (b) Submersão parcial em água; (c) Enxugamento de corpo de prova saturado; (d) Pesagem do cp saturado.....	70
Figura 35 - (a) Aparelho de ultrassom utilizado na pesquisa; (b) Medição do tempo de propagação da onda.....	71
Figura 36 - Prensa e corpo de prova com <i>micro-strain gages</i>	72
Figura 37 - Preparação do corpo de prova para o ensaio de compressão diametral; (b) Execução do ensaio.....	73
Figura 38 - Esquema do ensaio de tração por compressão diametral.....	74
Figura 39 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos	78
Figura 40 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos	78
Figura 41 – Resultados de <i>slump test</i> em concretos	82
Figura 42 – Massa unitária	83
Figura 43 – Resistência à compressão simples a 1 dia	86
Figura 44 – Resistência à compressão simples aos 7 dias	86
Figura 45 – Resistência à compressão simples aos 28 dias.....	87
Figura 46 - Resistência à compressão simples aos 105 dias.....	87
Figura 47 – Valores médios de resistência à compressão simples – Grupo C1.	88
Figura 48 - Intervalos de confiança de resistência à compressão simples vs Idade - Grupo C1.....	89
Figura 49 – Resistência à compressão simples VS. idade – Tipo B.....	90
Figura 50 – IEM ao longo do tempo	92
Figura 51 – Acréscimo de massa ao longo de tempo.....	93
Figura 52 – Absorção ao longo do tempo	94
Figura 53 – Densidade e massa específica	95
Figura 54 - Tempo de propagação dos concretos.....	97
Figura 55 - Velocidades de onda dos concretos.....	97
Figura 56 - Módulos de elasticidade dinâmicos.....	98
Figura 57 - Módulos de elasticidade estáticos.....	99

Figura 58 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral.....	100
Figura 59 - Correlação entre as médias dos dados de IEM e resistência à compressão simples.....	101
Figura 60 - Correlação entre os dados individuais por corpos de prova entre o IEM e a resistência à compressão simples.....	98
Figura 61 - Retas de regressão das correlações entre RCS e IEM por concreto, grupo C1....	102
Figura 62 - Retas de regressão das correlações entre RCS e IEM por concreto, grupo C2....	103
Figura 63 - Correlações entre absorção e índice de vazios - grupo C1.....	103
Figura 64 - Correlações entre absorção e índice de vazios - grupo C2.....	104
Figura 65 - Correlação entre as médias do ensaio de absorção e índice de vazios.....	104
Figura 66 - Correlação entre os dados individuais de absorção e índice de vazios.....	105
Figura 67 - Correlação entre os módulos de elasticidade e a resistência à compressão simples.....	106
Figura 68 - Correlação entre os módulos de elasticidade.....	106
Figura 69 - Regressões lineares entre os módulos de elasticidade, o índice de vazios, absorção e massa específica seca.....	107
Figura 70 - Aumento do índice de vazios e absorção com o aumento da quantidade de AMR.....	108
Figura 71 - Diminuição dos módulos de elasticidade, velocidade da onda e massa específica com o aumento do percentual de AMR.....	109
Figura E.1 - Correlação entre resistência à compressão simples e o IEM do concreto C1-ref a 1 dia.....	177
Figura E.2 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C1-30 a 1 dia.....	178
Figura E.3 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C1-50 a 1 dia.....	179
Figura E.4 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C2-ref a 1 dia.....	180
Figura E.5 - Correlação entre resistência à compressão simples e dureza superficial do concreto C2-100 a 1 dia	181
Figura E.6 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C1-ref ao 7° dia	182
Figura E.7 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C1-30 ao 7° dia	183

Figura E.8 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C1-50 ao 7° dia	184
Figura E.9 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C2-ref ao 7° dia	185
Figura E.10 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C2-100 ao 7° dia	186
Figura E.11 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C1-ref ao 28° dia	187
Figura E.12 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C1-30 ao 28° dia	188
Figura E.13 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C1-50 ao 28° dia	189
Figura E.14 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C2-ref ao 28° dia	190
Figura E.15 - Correlação entre resistência à compressão simples e IEM do concreto C2-100 ao 28° dia.....	191
Figura G.1 – Absorção e massa dos corpos de prova ao longo do tempo.....	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de resíduos de concreto em indústria de pré-fabricados.....	27
Tabela 2 – Valores de massa específica de agregados reciclados de concreto	32
Tabela 3 – Valores de absorção para RCC de concreto	34
Tabela 4 – Valores de resistência à compressão simples de concretos com agregado fino reciclado	38
Tabela 5 – Resistência à compressão de concretos.....	39
Tabela 6 – Módulos de elasticidade aos 28 dias.....	40
Tabela 7 – Módulos de elasticidade com utilização de agregado graúdo reciclado e superplastificante	41
Tabela 8 – Qualidade do concreto pelo índice esclerométrico média	42
Tabela 9 – Absorção por imersão em concretos com agregados reciclados	43
Tabela 10 - Produção de resíduos na indústria de pré-fabricados de concreto.....	49
Tabela 11 – Propriedades do cimento CP V – ARI utilizado na pesquisa.....	54
Tabela 12 – Traços de referência do programa experimental	62
Tabela 13 – Traços utilizados no programa experimental	63
Tabela 14 - Quantitativos de corpos de prova por traço e ensaio.....	67
Tabela 15 – Granulometria dos agregados naturais.....	76
Tabela 16 – Granulometria dos agregados reciclados	77
Tabela 17 – Teor de material pulverulento	79
Tabela 18 – Massa Específica e massa unitária.....	80
Tabela 19 – Absorção de água.....	81
Tabela 20 – Abrasão Los Angeles	81
Tabela 21 - Verificação de outliers.....	84
Tabela 22 – Valores de Resistência à compressão	85
Tabela 23 - Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à compressão simples.....	91
Tabela 24 – Resultados dos ensaios de esclerometria.	92
Tabela 25 – Aumento da massa dos concretos em função do tempo	93
Tabela 26 - Aumento da absorção em função do tempo.....	94
Tabela 27 – Índice de vazios, densidade e massa específica.....	95

Tabela 28 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.....	96
Tabela 29 - Módulos de elasticidade estáticos.....	99
Tabela 30 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral.....	100
Tabela 31 - Resultados de módulos de elasticidade estático e dinâmico.....	106
Tabela A.1 - Detalhamento dos volumes de produção e geração de resíduos da indústria de pré-fabricados.....	122
Tabela B.1 - Traços dos concretos utilizados no programa experimental.....	124
Tabela C.1 - Detalhamento dos valores de resistência à compressão simples.....	126
Tabela E.1 – Resistência à compressão e IEM do concreto C1-ref a 1 dia.....	128
Tabela E.2 – Resistência à compressão e IEM do concreto C1-30 a 1 dia	178
Tabela E.3 – Resistência à compressão e IEM do concreto C1-50 a 1 dia	179
Tabela E.4 – Resistência à compressão e IEM do concreto C2-ref a 1 dia.....	180
Tabela E.5 – Resistência à compressão e IEM do concreto C2-100 a 1 dia	181
Tabela E.6 – Resistência à compressão e IEM do concreto C1-ref ao 7° dia	182
Tabela E.7 – Resistência à compressão e IEM do concreto C1-30 ao 7° dia.....	183
Tabela E.8 – Resistência à compressão e IEM do concreto C1-50 ao 7° dia.....	184
Tabela E.9 – Resistência à compressão e IEM do concreto C2-ref ao 7° dia	185
Tabela E.10 – Resistência à compressão e IEM do concreto C2-100 ao 7° dia.....	186
Tabela E.11 – Resistência à compressão e IEM do concreto C1-ref ao 28° dia	187
Tabela E.12 – Resistência à compressão e IEM do concreto C1-30 ao 28° dia.....	188
Tabela E.13 – Resistência à compressão e IEM do C1-50 ao 28° dia.....	189
Tabela E.14 – Resistência à compressão e IEM do C2-ref ao 28° dia.....	190
Tabela E.15 – Resistência à compressão e IEM do C2-100 ao 28° dia.....	191
Tabela F.1 - Análise de semelhança estatística entre as amostras no ensaio de resistência à compressão simples.....	193
Tabela G.1 - Detalhamento dos dados de absorção por corpo de prova do concreto C1-ref..	195
Tabela G.2 - Detalhamento dos dados de absorção por corpo de prova do concreto C1-30..	196
Tabela G.3 - Detalhamento dos dados de absorção por corpo de prova do concreto C1-50..	197
Tabela G.4 - Detalhamento dos dados de absorção por corpo de prova do concreto C2-ref..	198
Tabela G.5 - Detalhamento dos dados de absorção por corpo de prova do concreto C2-100.....	199
Tabela H.1 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C1-ref.....	204

Tabela H.2 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C1-30.....	205
Tabela H.3 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C1-50.....	206
Tabela H.4 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C2-ref.....	207
Tabela H.5 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C2-100.....	208
Tabela I.1 – Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C1-ref.....	210
Tabela I.2 – Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C1-30.....	210
Tabela I.3 – Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C1-50.....	211
Tabela I.4 – Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C2-ref.....	211
Tabela I.5 – Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C2-100.....	212
Tabela J.1 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C1-ref.....	214
Tabela J.2 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C1-30.....	214
Tabela J.3 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C1-50.....	215
Tabela J.4 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C2-ref.....	215
Tabela J.5 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C2-100.....	216

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Percentuais de geração de resíduo da indústria.....	48
Quadro 2 - Especificações do superplastificante utilizado na pesquisa.....	54
Quadro 3 - Ensaio realizados na pesquisa.....	55
Quadro 4 - Formulário para preenchimento dos dados do ensaio de esclerometria.....	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 A construção civil no Brasil.....	19
1.2 A indústria de pré-fabricados.....	20
1.3 Justificativa	20
1.4 Objetivos.....	21
1.4.1 Objetivo geral.....	22
1.4.2 Objetivos específicos.....	22
1.5 Metodologia	22
1.6 Estrutura da pesquisa.....	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 A indústria de pré-fabricados.....	24
2.1.1 O processo produtivo.....	24
2.1.2 A geração de resíduos.....	26
2.2 Propriedades dos agregados reciclados	27
2.2.1 Agregados reciclados de concreto.....	28
2.3 Concretos produzidos com agregado reciclado	34
2.3.1 Concreto fresco	35
2.3.2 Concreto endurecido.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Introdução	44
3.2 Caracterização do processo produtivo.....	45
3.3 Agregado reciclado	48
3.3.1 Separação e beneficiamento dos resíduos.....	48
3.4 Agregados naturais.....	52
3.5 Aglomerante.....	53
3.6 Superplastificante	53
3.7 Ensaio de caracterização física e mecânica dos agregados	54
3.8 Dosagem experimental	61
3.9 Ensaio em concreto.....	63
3.10 Análise estatística para o ensaio de resistência à compressão simples.....	74
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	76
4.1 Agregados	76

4.2 Ensaaios do concreto.....	81
5 CONCLUSÕES	110
5.1 Conclusões principais.....	110
5.2 Propostas para futuras pesquisas.....	113
REFERÊNCIAS.....	114
Apêndice A – Dados da geração de resíduos da indústria de pré-fabricados.....	121
Apêndice B – Detalhamento dos traços dos concretos utilizados na pesquisa.....	123
Apêndice C – Detalhamento dos resultados de resistência à compressão simples.....	125
Apêndice D – Detalhamento dos dados de esclerometria por corpo de prova.....	127
Apêndice E – Correlações entre os resultados de esclerometria e resistência à compressão simples.....	176
Apêndice F – ANOVA e teste T para médias dos dados de resistência à compressão simples.....	192
Apêndice G – Detalhamento dos dados de absorção por corpo de prova.....	194
Apêndice H – Detalhamento dos dados de módulo de elasticidade dinâmico.....	203
Apêndice I – Detalhamento dos dados de módulo de elasticidade estático.....	209
Apêndice J – Detalhamento dos dados de resistência à tração por compressão diametral.....	213

1 INTRODUÇÃO

1.1 A construção civil no Brasil

A construção civil no Brasil é um setor importante para a economia. Segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2014), o setor é responsável por 5,4% do PIB (R\$ 221 bilhões), representa aproximadamente 8,59% do total de pessoas empregadas no Brasil e 22,7% de tudo que é produzido pela indústria brasileira. Caso seja inclusa toda a cadeia produtiva da construção civil, a participação no PIB brasileiro chega a 8%.

Em compensação, esse alto índice de atividade leva a um grande impacto ambiental. Estima-se que a construção civil consome entre 20% e 50% do total de recursos naturais disponíveis (LIMA, 2005). O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2014) estima que, em 2014, o Brasil consumiu cerca de 673 milhões de toneladas de agregados para construção, e projeta que esse número pode chegar a 807 milhões de toneladas em 2022.

Com relação ao concreto, anualmente são consumidos 11 bilhões de toneladas desse material, o que equivale ao consumo médio de 1,5 tonelada de concreto por habitante no Planeta, por ano (PEDROSO, 2009). A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2014) estima que o consumo de cimento no Brasil, principal componente do concreto, cresceu 180% na última década, e chegou a 71 milhões de toneladas em 2014 .

O resultado deste aumento do consumo está no encarecimento e na falta da matéria-prima da construção, que segundo a Federação das Indústrias de Pernambuco (FIEPE, 2013), já é um dos cinco principais problemas do setor da construção civil.

Além do alto consumo de matéria-prima, outro problema da construção civil é a alta taxa de geração de resíduos. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2014), em 2014, foram gerados cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos oriundos da construção civil no Brasil.

Uma das soluções para esses problemas é o uso de resíduos de agregados reciclados oriundos de resíduos da construção civil. No Brasil, desde meados da década de 1990, pesquisas têm sido realizadas na área, visando avaliar as propriedades destes agregados, e analisando a possibilidade de uso como agregado para: concreto, com ou sem função estrutural, argamassas, aterros, melhoramento de solos e estacas de fundação, com o objetivo de substituí-los pelo agregado natural.

1.2 A indústria de pré-fabricados

No âmbito da construção civil, um dos setores mais importantes é o da indústria de pré-fabricados. Segundo a Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto (ABCIC, 2013), a indústria de pré-fabricados é a que mais cresce no país, em comparação com os outros subsetores da construção. Ela representa 1,5% do total de empregados no setor construtivo e poderá chegar a 3% até 2018. Ela também produz 1,06 bilhão de metros cúbicos de concreto, e consome cerca de 420 mil toneladas de cimento e 116 mil toneladas de aço por ano.

A indústria de pré-fabricados de concreto é considerada mais sustentável que a indústria da construção convencional, pois além de maximizar os benefícios sociais e reduzir o impacto ambiental e econômico, a construção pré-fabricada atende estas características uma vez que os elementos estruturais industrializados são fabricados com controle de qualidade, maior consumo de cimento e garantia da espessura de recobrimento das armaduras, o que resulta em maior durabilidade das estruturas, menor desperdício na produção, menor variabilidade de características das estruturas como resistência, dimensões; entre outros (TOKUDOME, 2005).

A produção de pré-fabricados gera resíduos, que podem ser oriundos do próprio processo produtivo ou oriundos de materiais que não foram aprovados na inspeção de qualidade. Por isso, é importante estabelecer uma gestão estratégica destes resíduos, uma vez que o transporte para aterros ou recicladoras podem demandar um alto custo para a indústria.

Uma solução é o beneficiamento destes resíduos para a obtenção de agregados reciclados. Como os resíduos são homogêneos, e constituídos basicamente por concreto, o resíduo obtido (resíduo cinza), é um material que pode apresentar boas características para reciclagem.

1.3 Justificativa

Com o crescimento da indústria de pré-fabricados, surge a necessidade do aperfeiçoamento dos processos de fabricação, bem como a diminuição dos resíduos gerados por estes. Como no Brasil o setor de pré-fabricados ainda é um setor relativamente novo em comparação com as estruturas convencionais de concreto armado, feitas *in loco*, poucas pesquisas foram desenvolvidas até agora nesta área.

É importante estudar formas de diminuir a geração e reaproveitar os resíduos. O resíduo cinza é considerado um material nobre, e, depois de beneficiado, pode se transformar num agregado reciclado de alta qualidade, podendo ser utilizado para a produção de novos concretos. Por

isso, é importante a realização de estudos para analisar as propriedades, tanto dos agregados reciclados, como dos produtos gerados a partir destes.

A utilização de agregados reciclados não tem apenas um impacto econômico positivo, por deixar de se utilizar o agregado natural. Os resíduos deixam de ser despejados de forma ilegal em áreas de vulnerabilidade social, causando também impacto ao meio ambiente. Além disso, diminui a extração das matérias-primas em jazidas, atividade que causa grande impacto ambiental.

Apesar da utilização de resíduos de construção civil (RCC) trazer benefícios sociais e ambientais, ainda não existe, no Brasil, normatização para a utilização de RCC em concretos estruturais. Em algumas cidades de países, como Dinamarca, Holanda, Reino Unido e Alemanha, as leis municipais estabelecem percentuais mínimos de agregados reciclados para uso em concretos estruturais, desde que o resíduo contenha no mínimo 90% de concreto e argamassa em sua composição (SILVA *et al.*, 2015). Na Dinamarca e na Holanda, segundo Soares *et al.* (2014), a taxa de reciclagem de resíduos de construção chega a 90%.

Logo, é importante a elaboração de trabalhos acadêmicos com a finalidade de provar que os agregados reciclados também podem ser utilizados em peças estruturais, e assim pressionar órgãos normalizadores, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a criarem normas específicas sobre o assunto.

O AMBITEC, grupo de pesquisa do Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco, voltado para estudos aplicados de engenharia no meio ambiente e tecnologia de fundações, já tem realizados vários estudos na área de reciclagem de resíduos de construção civil (ARAÚJO JÚNIOR, 2010; RODRIGUES, 2011; PROENÇA, 2012; FARIAS, 2013; CAVALCANTI, 2013; LUNDGREN, 2014; RODRIGUES, 2015).

Neste contexto, dando continuidade aos estudos desenvolvidos pelo referido grupo, a presente pesquisa analisa a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados de resíduos provenientes de uma indústria de pré-fabricados de concreto, localizada no Complexo Portuário de Suape, pertencente ao município do Cabo de Santo Agostinho – PE.

1.4 Objetivos

Com o intuito de responder aos questionamentos anteriormente mencionados, foi necessário estabelecer o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa consiste em realizar uma análise das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto de uma indústria de pré-fabricados de concreto, para uso em concreto estrutural.

1.4.2 Objetivos específicos

Como forma de alcançar o objetivo proposto, são desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as características da empresa, seu processo de produção e a geração de resíduos;
- Caracterizar fisicamente os resíduos como agregados reciclados para concreto;
- Analisar as propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados oriundo de resíduo cinza;

1.5 Metodologia

O método adotado no desenvolvimento do presente trabalho constou de forma resumida nos seguintes itens:

i) revisão bibliográfica sobre os assuntos envolvidos, envolvendo publicações nacionais e internacionais;

ii) caracterização da empresa de pré-fabricados de concreto, analisando seu processo produtivo, suas fontes e quantidades de geração de resíduo.

iii) coleta de amostra de resíduo cinza gerado pela empresa, no processo de produção dos pré-fabricados de concreto, e beneficiamento com uso de britador de mandíbula, para obtenção do agregado reciclado;

iv) realização de ensaios de caracterização de agregados reciclados e naturais, para a obtenção de índices como massa específica, absorção de água, massa unitária, material pulverulento, distribuição granulométrica, índice de forma e abrasão Los Angeles.

v) realização de testes de produção de concreto com agregados reciclados e naturais, e definição dos traços e teores de substituição do agregado reciclado pelo natural;

- vi) produção de concreto com os traços definidos e moldagem dos corpos de prova;
- vii) realização de ensaios de resistência à compressão simples, esclerometria, módulo de elasticidade e absorção de água com os corpos de prova;
- viii) verificação da semelhança estatística entre as amostras de resistência à compressão simples;
- ix) análise e interpretação dos resultados obtidos.

1.6 Estrutura do trabalho

A apresentação do trabalho está dividida em cinco capítulos:

Uma breve introdução, com a justificativa do trabalho, objetivos, metodologia e estrutura da pesquisa, no capítulo 1.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o processo produtivo da indústria de pré-fabricados e como são gerados os resíduos nesta indústria; uma abordagem sobre trabalhos que utilizaram o RCC cinza como agregado reciclado para uso em concretos.

O capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados na pesquisa.

No quarto capítulo são expostos e analisados os resultados parciais obtidos na pesquisa

E no capítulo cinco, conclusões obtidas a partir das discussões dos resultados e sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A indústria de pré-fabricados

Segundo a NBR 9062:2006 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, um elemento pré-fabricado é aquele produzido fora do local definitivo da estrutura, em usina ou em condições análogas que disponham de pessoal e instalações laboratoriais permanentes para o controle de qualidade.

Em comparação com a indústria da construção civil tradicional, a pré-fabricação pode reduzir em até 50% o consumo de energia, água e agregados. Esta indústria tem tido um destaque na Europa, apontada com um dos sistemas construtivos que menos agridem o meio ambiente (M. COUTO; P. COUTO, 2007).

Além da diminuição da geração de resíduos, conforme M.Couto; P.Couto (2007), no que se confere à gestão de resíduos, a indústria de pré-fabricados também tem se destacando na Europa pelas seguintes iniciativas:

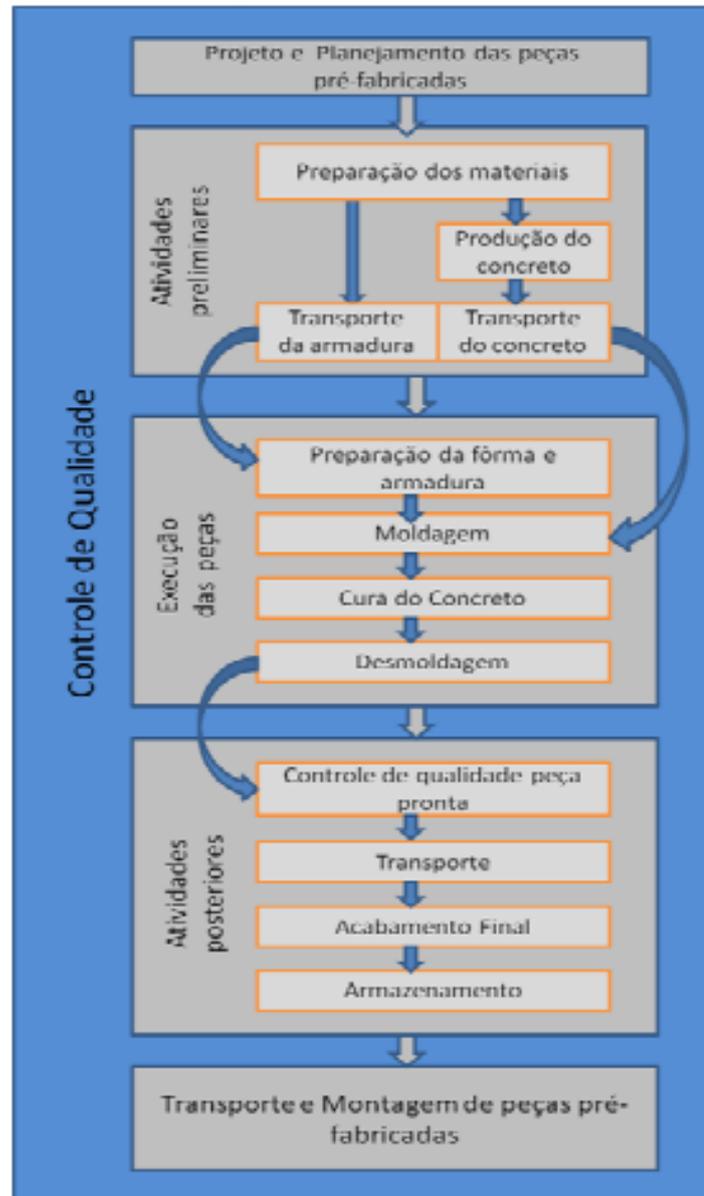
- As águas residuais industriais, que têm origem no processo de fabrico dos pré-fabricados, são tratadas em ETA's industriais, dimensionadas para esse efeito, e reaproveitadas no processo de fabricação. Assim, estas águas circulam em circuito fechado. Os dejetos resultantes deste processo são depois recicladas numa entidade acreditada para o efeito;
- Os restos de concreto são reduzidos a pó e depois reintegrados no processo de produção dos pré-fabricados, funcionando assim como um sistema de produção fechado, onde todo o material gasto é processado e utilizado novamente.

2.1.1 O processo produtivo

O sistema de concretagem dos pré-fabricados, na fase de produção de concreto e concretagem das peças é similar ao sistema tradicional de concreto armado, com a principal diferença de que as peças não são concretadas *in loco*, e sim num local específico na usina, para depois serem transportadas até o local da obra.

No fluxograma apresentado na Figura 1, observam-se as etapas do processo produtivo de uma indústria de pré-fabricados.

Figura 1 – Fluxograma de produção em uma indústria de pré-fabricados. Fonte: Cavalheiro (2011), adaptado de El Debs (2000)



Durante a concretagem, são moldados corpos de prova, que serão rompidos à compressão para o controle tecnológico do concreto. Geralmente, as empresas de pré-fabricados optam pelo cimento do tipo CP V – ARI, que possui uma alta resistência inicial nas primeiras horas. Assim, para a peça ser liberada para transporte, além da avaliação visual do concreto após a desforma, também é necessário que esse concreto atinja a resistência de desmolde, que corresponde a uma faixa entre 70% e 80% da resistência característica do concreto aos 28 dias. Este controle tecnológico garante uma maior agilidade da obra e também diminui o tempo de ocupação do espaço físico dentro da área de armazenamento da indústria.

Ao final, as peças ainda passam por um acabamento final, que visa principalmente consertar possíveis falhas deixadas na concretagem. As formas utilizadas no processo podem ser de

madeira ou metal, mas as empresas costumam utilizar formas metálicas devido a durabilidade e o acabamento que elas proporcionam.

Além do processo de concretagem com lançamento e adensamento, semelhante ao processo de concretagem *in loco*, também existem os processos de extrusão e centrifugação. O processo de extrusão consiste na compactação do concreto seco e a colocação desse concreto sobre uma pista, que será então seccionado para a formação das lajes alveolares, por meio de uma máquina extrusora (Figura 2); na centrifugação, o concreto, junto com a armadura é envolto por uma forma cilíndrica metálica, que gira numa alta velocidade, realizando então o adensamento do concreto.

Figura 2 - Máquina extrusora. Fonte: Página do site da WCH Industrial



2.1.2 A geração de resíduos

De acordo com manual da ABCIC (2013), em uma indústria de pré-fabricados, o concreto desperdiçado é proveniente de elementos rejeitados pelo controle de qualidade, final de linhas de produção e sobras de concreto fresco ao final do processo. Em tais empreendimentos ocorre basicamente a geração de dois tipos de resíduos: rejeitos de concreto no estado fresco e rejeitos de concreto no estado endurecido, existindo inúmeros processos que podem ser aplicados na sua reciclagem.

Segundo Buttler (2007), nas empresas de pré-fabricados de concreto, diferentes de canteiros de obras onde os resíduos são bem diversificados, o processo de reciclagem pode ser considerado simplificado e realizado no próprio local de geração, uma vez que tais resíduos são considerados nobres, ou seja, não são misturados com nenhum outro tipo de resíduo. Essas características dos resíduos de concreto facilitam seu emprego em aplicações com alto

valor agregado, tais como produção de concreto estrutural e pré-moldados. Além disso, as normas são menos restritivas em comparação com o concreto de resíduo de construção e demolição (RCD) permitindo o emprego destes materiais até 60 MPa.

A quantidade de resíduos gerados depende diretamente da forma como as peças são fabricadas. De maneira geral, vigas e pilares são concretadas de forma tradicional; as lajes são produzidas por uma máquina extrusora. Este processo tende a gerar mais resíduos que o primeiro, pois, no final da produção, existe uma sobra de concreto que não é aproveitada.

Gonçalves (2011) calculou a geração dos resíduos nos cinco primeiros dias dos cinco primeiros meses do ano de 2010 em uma indústria de pré-fabricados localizada na Região Metropolitana de Porto Alegre. Observou-se nos projetos (croquis) o tamanho das peças confeccionadas e o volume de concreto necessário, sendo levantada a quantidade de concreto produzida na central dosadora da empresa, por traço, concluindo-se que a diferença entre estes valores seria a geração de resíduos, conforme a Tabela 1. Ao final, calculou-se a razão resíduo/produção, que mensura, em porcentagem, a quantidade resíduo gerado durante o período da coleta de dados, onde o valor obtido foi 1,78%.

Tabela 1 – Produção de resíduos em indústria de pré-fabricados. Fonte: Gonçalves (2011)

Concreto	Geração de resíduos (m ³ /mês)					Total produção (m ³ /mês)	Total de resíduo (m ³ /mês)	% Resíduo/Produção
	1°	2°	3°	4°	5°			
1 (RCC)	3,4	1,4	0,84	4,03	3,88	466,56	13,55	2,9
2	0,31	0,45	0,7	0,3	0,25	173,75	2,04	1,17
3	0,74	0,5	0,15	0,15	0,3	176,25	1,84	1,04
4 (RCT)	0,15	3,68	4,86	0,94	1,11	1000,6	17,5	1,17
5	0	0	0	0	0	72,5	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0,78	0,27	0	0	81,25	1,05	1,29
8	0	0	1,44	0	0	104	1,44	1,38
TOTAL						2.074,91	37,02	MÉDIA 1,78

Legenda: RCC = Resíduo de cura convencional; RCT = Resíduo de cura térmica

2.2 Propriedades dos agregados reciclados

Segundo Neville (1997), os agregados utilizados para a fabricação de concreto exercem influência na sua qualidade, pois pelo menos $\frac{3}{4}$ partes do seu volume é ocupado pelos agregados, influenciando não apenas na resistência, mas podendo também comprometer a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

Eles têm uma grande importância do ponto de vista econômico, porém altos valores de contaminantes, materiais pulverulentos e absorção de água, os quais afetam diretamente na trabalhabilidade e na resistência do concreto.

Segundo Oliveira *et. al* (2012), para estudar a reutilização dos resíduos de construção civil, é necessário caracterizar os agregados reciclados, submetendo-os a ensaios, de acordo com as normas vigentes, com o intuito de conhecer suas propriedades. Essa caracterização é de grande importância para a confecção de concreto, pois de acordo com Bauer (2000): “Os agregados contribuem com cerca de 80% do peso e 20% do custo do concreto”. Além disso, as propriedades dos agregados possuem correlação com as propriedades do concreto.

Um fator que pode influenciar as características dos agregados reciclados é o processo de beneficiamento, que depende do tipo de britador utilizado. Os mais utilizados para essa finalidade são os do tipo mandíbula, martelo e impacto. Segundo Pedro *et al.* (2014), é difícil relacionar o processo de britagem às propriedades dos agregados, uma vez que os autores, na maioria das vezes, não citam o tipo de britador utilizado. Os autores obtiveram, em sua pesquisa experimental, resultados que mostram que quanto mais rigoroso e repetido for o processo de reciclagem, melhor será o desempenho mecânico do concreto.

2.2.1 Agregados reciclados de concreto

O concreto produzido para fins de pré-fabricação é, geralmente, obtido através de um rigoroso sistema de qualidade. Logo, espera-se que os resíduos obtidos a partir desse tipo de concreto sejam recicláveis, visando utilizar os agregados reciclados para a produção de novos concretos. Além disso, os resíduos de elementos pré-fabricados de concreto têm menos contaminantes que os resíduos comuns de construção civil (RCC) (BRITO *et al.*, 2014).

É importante então conhecer as características dos resíduos de concreto para avaliar sua aplicabilidade em novos concretos, por meio de ensaios de granulometria, massa específica, absorção de água, material pulverulento e massa unitária, dentre outros.

2.2.1.1 Composição granulométrica

A granulometria dos agregados tem importante influência nas características do concreto, tais como o consumo de aglomerante, trabalhabilidade, compactidade, absorção à água, permeabilidade, resistência mecânica, entre outras (HELENE & TERZIAN, 1993; BARRA, 1996; LIMA, 1999).

No caso dos agregados reciclados, a granulometria pode variar de acordo com diversos fatores, tais como o seu processo produtivo, as características granulométricas do resíduo antes do processado da britagem, a origem do material, entre outros. Assim, a curva granulométrica é característica específica de cada tipo particular de resíduo reciclado (BARRA, 1996; LIMA, 1999).

Brito e Evangelista (2007) confeccionaram concretos em laboratório e os britaram no trigésimo quinto dia de cura. Utilizaram um britador de mandíbulas de escala laboratorial, que produzia agregados de, no máximo, # 38,1 mm de diâmetro. Só foram aproveitadas partículas entre # 0,074 e # 1,18 mm, configurando então um agregado reciclado fino. O comportamento granulométrico entre o agregado fino natural (AFN) e o agregado fino reciclado (AFR) foi semelhante, com ambos apresentando o mesmo módulo de finura de 2,38 (Figura 3).

Gonçalves (2011) realizou uma análise de agregados reciclados a partir de resíduos de uma fábrica de pré-fabricados de concretos situada no município de Porto Alegre (Figura 4). A autora realizou ensaios de granulometria após curar as amostras em uma solução de água, e cal, por 7, 28 e 63 dias, contando a partir do primeiro dia de beneficiamento. O resíduo foi todo beneficiado em britador de mandíbula, conferindo uma característica graúda ao material. A dimensão máxima característica do material foi de #19 mm, com a maior fração ficando retida entre as peneiras de #12,5 e #19 mm.

Figura 3 – Composição granulométrica de agregados finos natural e reciclado. Fonte: Brito e Evangelista (2007)

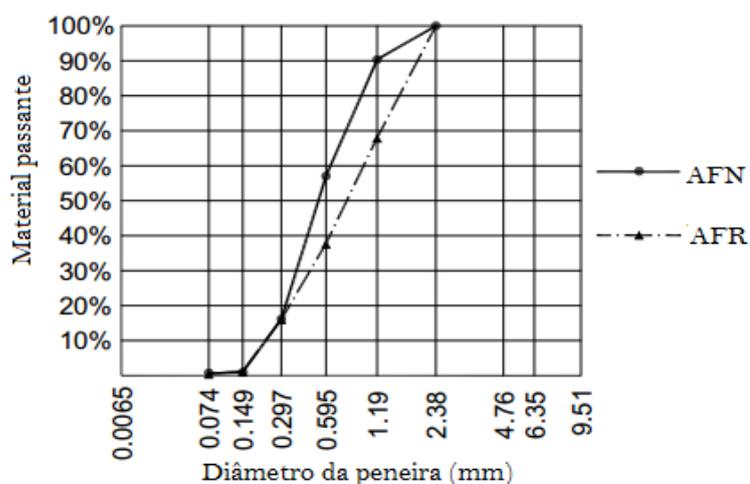
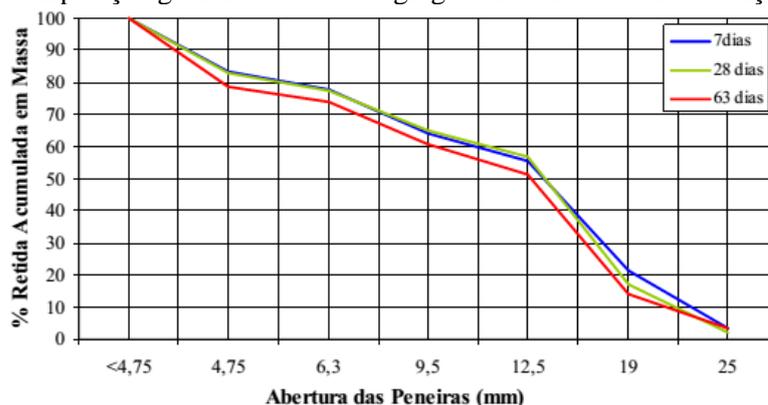


Figura 4 – Composição granulométrica do agregado reciclado. Fonte: Gonçalves (2011)



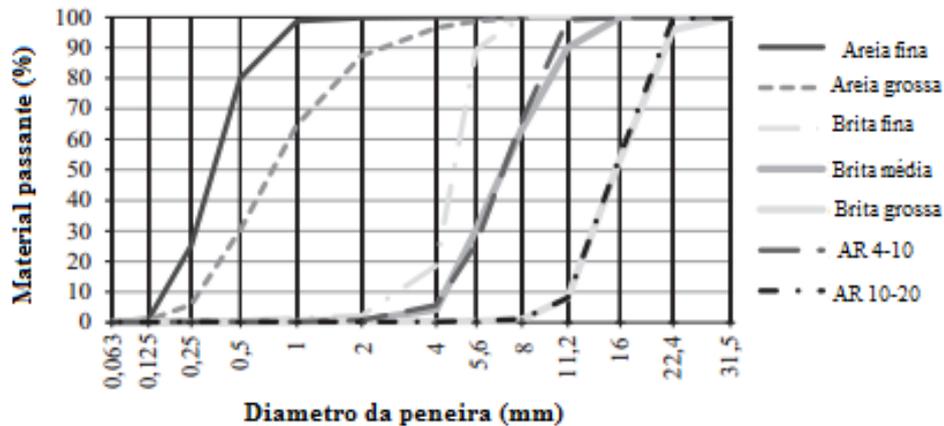
Observa-se ainda, que na Figura 4, as curvas dos agregados que foram curados por um período de 7 e 28 dias, tiveram apenas um pequeno aumento das percentagem retidas posteriores à peneira com malha de #12,5 mm. Já os agregados que permaneceram em solução por 63 dias, apresentaram uma granulometria superior aos outros dois. Isso se deve à hidratação do cimento contido nestes agregados, pois os agregados de resíduos cinza, obtidos a partir concretos e argamassas cimentícias, possuem partículas de cimento que ainda não foram hidratadas. Quando submetidas ao processo de cura, estas partículas hidratam e aumentam de tamanho, resultando no fenômeno descrito.

Soares *et al.* (2014) estudaram a granulometria de agregados reciclados oriundos de resíduos da indústria de pré-fabricados de concreto, que tinham resistência característica entre 35 e 50 MPa. Foram estudadas duas frações de agregados: uma entre 4 e 10 mm (AR 4 – 10), e outra entre 10 e 20 mm (AR 10 – 20).

Os resíduos foram beneficiados em três etapas: na primeira, foi utilizado um britador de mandíbula, e na segunda e terceira etapas foram utilizados britadores de martelo, e, posteriormente, os agregados reciclados passaram por uma correção granulométrica (peneiramento) para se encaixarem na granulometria dos agregados naturais.

Observa-se, na Figura 5, que o AR 4 – 10 obteve uma granulometria muito semelhante à brita média natural, enquanto a granulometria do AR 10 – 20 foi muito próxima da brita grossa natural.

Figura 5 – Composição granulométrica do agregado reciclado. Fonte: Soares et al. (2014)



Além da curva granulométrica, é importante analisar a forma dos grãos dos agregados. Agregados reciclados tendem a apresentar grãos achatados e de forma lamelar, o que interfere no encaixe das partículas, aumentando o número de vazios. Esse aumento dos vazios interfere diretamente nas propriedades dos agregados reciclados, e também nos concretos produzidos com eles (SOARES *et al.*, 2014).

2.2.1.2 Massa específica

A massa específica do agregado é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis (GONÇALVES, 2011). Tal propriedade está intimamente ligada à porosidade, e as duas guardam entre si uma relação inversamente proporcional (TENÓRIO, 2007).

Quando comparados com agregados naturais, os agregados reciclados apresentam valores um pouco menores de massa específica e massa unitária, devido aos materiais antigos aderidos às partículas dos agregados reciclados, como argamassa (HANSEN, 1992; LEITE, 2001).

Na Tabela 2, observa-se resultados de massa específica, massa específica aparente, e massa específica saturada para agregados reciclados de RCC de concreto investigados por diferentes autores. Pode-se observar que os valores de massa específica variam de 2,33 g/cm³ a 2,68 g/cm³.

Tabela 2 – Valores de massa específica de agregados reciclados de concreto

Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Origem	Granulometria	Cidade	Referência
2,61	-	2,48	Corpos de prova de concreto	Graúdo	São Carlos (Brasil)	Gonçalves (2001)
2,58	-	2,43	Corpos de prova de concreto	Graúdo	São Carlos (Brasil)	Buttler (2003)
2,36 a 2,75	-	2,33 a 2,68	Diversos usos de concreto	Graúdo e miúdo	São Carlos (Brasil)	Prado (2006)
2,16	1,91	-	Corpos de prova de concreto	Miúdo	Lisboa (Portugal)	Evangelista e Brito (2007)
-	-	2,42	Resíduos de concreto do aeroporto de Hong Kong	Graúdo	Hong Kong (China)	Kou and Poon (2012)
-	2,51	2,58	Rejeitos de pré-fabricados de concreto	Graúdo	Lisboa (Portugal)	Soares et al. (2014)
-	2,52	2,54	Rejeitos de pré-fabricados de concreto	Miúdo	Lisboa (Portugal)	Brito et al. (2016)

2.2.1.3 Material pulverulento

Por definição, material pulverulento é todo aquele que passa na peneira de malha 75 µm, por lavagem. Esses finos são considerados partículas nocivas ao concreto, pois afetam a relação água/cimento, e, conseqüentemente, a resistência do concreto (CAVALCANTI, 2014).

Partículas muito finas proporcionam uma maior disponibilidade da área superficial para o agregado. Elas demandam mais água, e conseqüentemente, mais cimento. Além disso, o material pulverulento aumenta o custo do concreto, a retração hidráulica, e contribui para a formação de zonas de fraqueza na interface pasta-agregado, onde o concreto pode facilmente romper (FUEYO, 2002; LEE, 2009; DE JUAN, 2005 *apud* MARTÍN-MORÁLES *et al.*, 2011).

Durante o processo de beneficiamento dos resíduos para obtenção do agregado reciclado, há uma grande produção de um material muito fino, semelhante a uma poeira, que se deposita no

agregado reciclado. Por isso, de forma geral, os agregados reciclados costumam apresentar valores maiores de material pulverulento em comparação com os agregados naturais.

A NBR 7211:2009, estabelece os valores máximos de material pulverulento para agregados para concreto:

- Para concretos não submetidos ao desgaste superficial, 1% para agregados graúdos e 5% para agregados miúdos;
- Para concretos submetidos ao desgaste superficial, 1% para agregados graúdos e 3% para agregados miúdos.

Tais recomendações, entretanto, são aplicáveis para agregados naturais. Para agregados reciclados, não existe normalização para uso em concretos estruturais. De forma geral, na literatura, os valores de resultados de ensaios em agregados reciclados variam de forma significativa, e ficam acima do estabelecido na NBR 7211:2009.

A NBR 15116:2004, que estabelece os requisitos dos agregados reciclados para uso em concreto não estrutural, indica um teor máximo de material pulverulento em 15% para agregados miúdos e 10% para agregados graúdos, ambos oriundos de resíduos de concreto.

Em sua pesquisa com corpos de prova de concreto, Barbosa Júnior (2008) encontrou um teor de material pulverulento em 7,89%. Rodrigues (2011), em sua pesquisa com RCC misto encontrou um valor de 8,70%. Sampaio (2013) obteve um valor de 12,8% para agregados reciclados de uma usina de beneficiamento.

2.2.1.4 Absorção de água

A absorção de água é a umidade medida quando todos os poros do agregado estão saturados, mas a superfície está seca.

A taxa de absorção do agregado reciclado depende de vários fatores, como: o tipo de beneficiamento e o britador utilizado, a origem do material, a granulometria e a massa específica do agregado reciclado, e também o grau de hidratação do material utilizado para o agregado reciclado (CARRIJO, 2005; BUTTLER, 2007; BENETTI, 2012).

A alta absorção de água dos agregados reciclados pode influenciar tanto nas características do concreto fresco como no concreto endurecido. Concretos com agregados reciclados tendem a serem mais porosos, e conseqüentemente, absorverem mais água e serem menos resistentes à

compressão, quando comparados aos concretos com agregados naturais. Além disso, afetam também a trabalhabilidade do concreto (MARTÍN-MORÁLES *et al.*, 2011).

Khatib (2005) estudou o uso de agregados finos reciclados em concretos. A areia e a brita natural obtiveram 0,80% e 0,50%, respectivamente. O agregado reciclado de concreto obteve 6,25% de absorção, e o agregado reciclado de tijolos teve um valor de absorção de 14,75%.

Em sua pesquisa, Soares *et al.* (2014), produziu agregados graúdos reciclados de concreto para a produção de novos concretos. Enquanto os agregados naturais obtiveram uma absorção entre 0,41% e 1,84%, a absorção dos agregados reciclados variou entre 4,56% e 4,67%.

Na Tabela 3, apresentam-se valores de absorção de água em pesquisas de RCC de concreto. No geral, os agregados reciclados apresentam valores de absorção superiores em relação aos agregados naturais.

Tabela 3 – Valores de absorção para RCC de concreto

Taxa de absorção de água (%)	Granulometria	Origem	Cidade	Referência
6,25	Miúdo	Demolição de estrutura de concreto	Sheffield (Inglaterra)	Khatib (2004)
13,10	Miúdo	Corpos de prova de concreto	Lisboa (Portugal)	Evangelista; Brito (2007)
4,50 a 6,50	Graúdo	Corpos de prova de concreto	São Leopoldo (Brasil)	Werle (2010)
5,24 a 8,49	Graúdo	Corpos de prova de concreto	São Leopoldo (Brasil)	Werle <i>et al.</i> (2011)
7,30	Graúdo	Pré-fabricados de Concreto	Zaragoza (Espanha)	Pérez-Benedicto <i>et al.</i> (2011)
4,57 a 4,66	Graúdo	Pré-fabricados de concreto	Lisboa (Portugal)	Soares <i>et al.</i> (2014)

2.3 Concretos produzidos com agregado reciclado

Geralmente, a incorporação total ou parcial de agregados reciclados na composição do concreto diminui seu desempenho quando comparado ao concreto análogo a este, ou seja, com 100% de agregados naturais. Este fenômeno é causado pelas características dos agregados reciclados, que, devido à argamassa aderida aos agregados, possuem uma textura mais áspera e lamelar (POON; SHUI; LAM, 2004). Além da textura diferente, os agregados

reciclados também são menos densos que os agregados naturais. Tais características influenciam diretamente nas características do concreto fresco e endurecido produzido com agregados reciclados.

Com relação ao concreto fresco, concretos produzidos com agregados reciclados requerem mais água para manter uma trabalhabilidade igual ao do concreto análogo com agregado natural (CAN), pois os agregados reciclados absorvem mais água e contém um teor maior de material pulverulento. Além disso, eles possuem uma densidade menor, o que acarretam em um concreto fresco com massa unitária menor que o CAN (SOARES *et al.*, 2014).

Como mencionado anteriormente, argamassa aderida às partículas dos agregados reciclados condiciona-os a uma textura mais áspera e lamelar, afetando diretamente o concreto, com o aumento de sua porosidade. Esse aumento da porosidade dos concretos com agregados reciclados, por sua vez, afeta negativamente o desempenho do concreto, tanto em termos de resistência mecânica como de durabilidade (DE BRITO; ALVES, 2010; GOMES; DE BRITO, 2009).

2.3.1 Concreto fresco

2.3.1.1 Trabalhabilidade

A consistência do concreto é uma das suas principais características, pois determina a capacidade do concreto se deformar sob a ação de sua própria massa no estado fresco, e exerce grande influencia nas propriedades do concreto endurecido (HELENE; ANDRADE, 2007; GONÇALVES, 2011).

Os agregados, segundo Leite (2001), podem não só influenciar na trabalhabilidade, como nas propriedades físicas e mecânicas do concreto.

Concretos com agregados reciclados tendem a ter consistência mais seca, se for mantida a relação água cimento. A porosidade e o teor de material pulverulento elevam o teor de absorção da mistura. O uso do agregado reciclado numa umidade intermediária ajuda a diminuir os efeitos da alta absorção (LEVY, 1997; TENÓRIO, 2007).

Outro fato relevante é que, em geral, a massa específica dos agregados reciclados é menor que a dos agregados naturais, a substituição em massa destes por agregados reciclados conduz a um maior volume de agregados na mistura, o que também pode aumentar a quantidade de

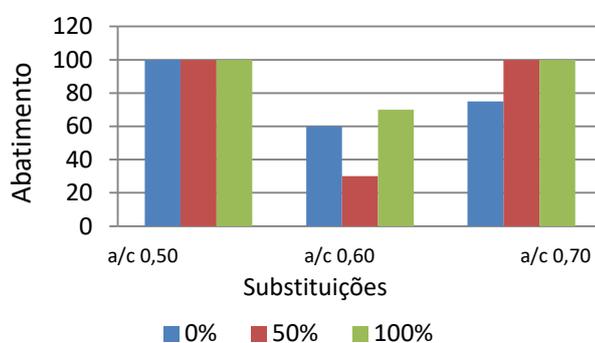
água requerida para a mesma trabalhabilidade. Como resultado desta situação tem-se uma fricção interna alta nos concretos confeccionados com agregados reciclados, exigindo maior quantidade de pasta, para que se tenha a mesma trabalhabilidade dos concretos produzidos com agregados naturais (RAKSHVIR e BARAI, 2006).

Agregados britados em tipos diferentes de equipamentos apresentam formas diferentes, conduzindo a áreas superficiais diferentes, o que também influencia na quantidade de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade. Geralmente, quanto menor o diâmetro do agregado, maior será sua absorção, e conseqüentemente demandará mais água.

Em seu estudo, Khatib (2004) produziu concretos com diferentes teores de agregados reciclados e fixou a relação água/cimento em 0,50. Em seus resultados, o concreto de referência, sem agregado reciclado, obteve uma trabalhabilidade de 20 cm no ensaio do tronco de cone; concretos com agregados reciclados de concreto tiveram um abatimento entre 15 e 18 cm, e os com agregados de resíduos de tijolos entre 8 e 15 cm. À medida que se aumentou a quantidade de agregados reciclados, o abatimento diminuiu.

Cavalcanti (2014) estudou concretos com agregados reciclados de concreto, com teores de substituição de 0%, 50% e 100% e relações água/cimento variando entre 0,50, 0,60 e 0,70 (Figura 6). Diferentes de outras pesquisas, não houve uma diminuição da trabalhabilidade com o aumento de ARC. Houve, entretanto, um aumento na viscosidade do concreto, que não pode ser mensurado no ensaio de tronco de cone, mas que dificulta o manuseio e o lançamento do concreto.

Figura 6 – Abatimento das famílias de concreto produzidas. Fonte: Cavalcanti (2014)



2.3.1.2 Massa unitária

A massa unitária de concretos no estado fresco diminui à medida que se aumenta a substituição de agregados naturais por reciclados. Isso se deve ao aumento da porosidade e ao

fato dos agregados reciclados terem uma forma lamelar, que dificulta o encaixe entre as partículas, aumentando o número de vazios.

Rodrigues (2011) constata uma diminuição média de 3% dentro de um mesmo traço, na medida que houve o aumento do teor de agregado reciclado na mistura.

Soares *et al.* (2014), em sua pesquisa, observaram que a massa unitária do concreto fresco diminuiu linearmente à medida que a quantidade de agregados reciclados aumentou. O autor testou substituições em volume de agregados reciclados em porcentagens de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100%, variando a relação a/c e fixando o abatimento de tronco de cone.

2.3.2 Concreto endurecido

2.3.2.1 Resistência à compressão simples

Concretos com agregados reciclados são, geralmente, menos resistentes à compressão que concretos análogos com agregados naturais, pois tendem a demandar mais água, aumentando a relação água/cimento.

Além disso, segundo Gonçalves (2011), a argamassa aderida às partículas do agregado reciclado de concreto colabora para a diminuição da resistência do concreto feito com este material.

A partir de uma vasta revisão bibliográfica sobre o assunto, Li (2008) concluiu que concretos com 100% de substituição de agregados naturais pelos agregados reciclados de concreto possuem uma diminuição da resistência à compressão da ordem de 12% a 25%. Quando o teor de substituição é menor que 20%, a diminuição de resistência é insignificante.

Para Soares *et al.* (2014), quando a relação a/c é fixada, ainda não existe um consenso se há uma diminuição significativa da resistência à compressão, causada pelas substituições dos agregados reciclados.

Evangelista e Brito (2007) moldaram corpos de prova cúbicos de concreto e estudaram o desempenho deles a partir de substituições em massa de 0%, 10%, 20%, 30%, 50% e 100%. Os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias. A relação a/c variou em cada traço do concreto, e a trabalhabilidade foi fixada. Não houve uma relação linear entre o teor de substituição e a resistência à compressão, apresentando uma oscilação dos valores (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores de resistência à compressão simples de concretos com agregado fino reciclado.

Fonte: Evangelista; Brito (2007)

Teor de substituição (agregado fino reciclado)	Relação a/c	Resistência à compressão simples (MPa)
0 %	0,41	59,4
10%	0,42	62,2
20%	0,44	58,4
30%	0,45	61,3
50 %	0,46	60,8
100%	0,48	61,0

Troian (2010) realizou ensaios de resistência à compressão de concretos com agregados reciclados de concreto, com teores de substituição de 25%, 50%, 75% e 100% e foram fixadas três relações a/c: 0,85, 0,56 e 0,43. Ao final, observou-se que os concretos com 100% de agregados reciclados tiveram um desempenho menor quanto à resistência à compressão, comparado aos outros concretos.

Gonçalves (2011) comparou os valores de resistência à compressão de concretos com substituição em volume de 50% de agregados graúdos reciclados oriundos de empresas de pré-fabricados com concretos com agregados naturais (AGN). Os agregados reciclados foram curados por cura convencional (RCC) ou por cura térmica (RCT). Fixando a relação a/c, concluiu-se que os concretos com agregados reciclados com cura convencional tiveram resultados de resistência à compressão melhores em comparação com os agregados naturais (Tabela 5). Esta melhora se deu devido à diminuição do teor de material pulverulento, que resultou numa menor demanda de água por parte do concreto.

2.3.2.2 *Módulo de elasticidade*

Fatores como relação a/c, teor e densidade dos agregados reciclados são variáveis que influenciam nos valores do módulo de elasticidade, de forma que quanto maior a relação a/c e o teor de agregado reciclado utilizado na mistura do concreto, menor será o valor do módulo de elasticidade (LEITE, 2001; ISAIA, 2005).

Tabela 5 – Resistência à compressão de concretos. Fonte: Gonçalves (2011)

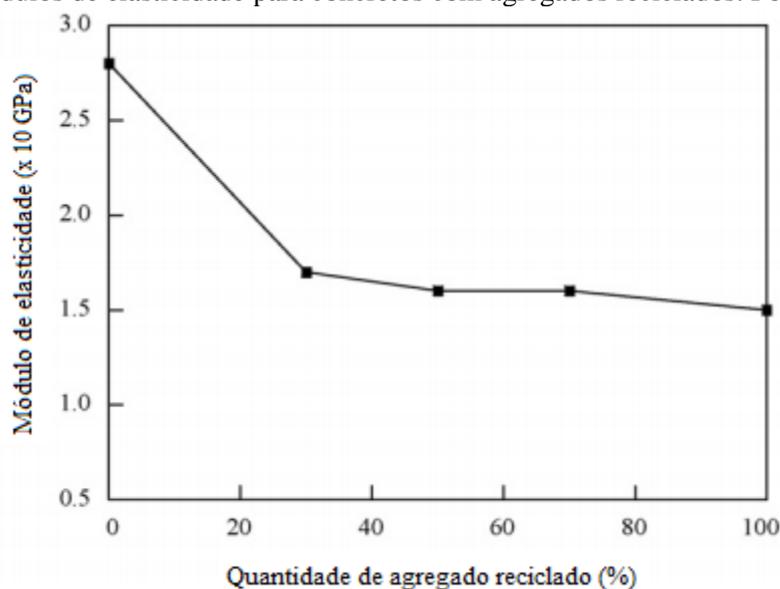
Traço do concreto	Tipo de agregado reciclado de concreto	Resistência (MPa)		
		7 dias	28 dias	63 dias
Traço pobre (a/c = 0,60)	AGN	17,9	26,6	31,1
	RCC	24,7	28,8	32,3
	RCT	20,1	23,9	25,6
Traço intermediário (a/c = 0,49)	AGN	21,0	29,1	37,4
	RCC	31,4	35,1	43,7
	RCT	21,5	30,4	28,2
Traço rico (a/c = 0,42)	AGN	28,1	45,6	44,3
	RCC	31,8	44,9	48,7
	RCT	25,9	31,2	38,3

Uma das propriedades que afetam o módulo de elasticidade do concreto é a porosidade. Isso se deve ao fato da porosidade do agregado determinar sua rigidez, o que por sua vez, controla a capacidade do agregado de resistir à deformação da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A argamassa aderida às partículas do agregado reciclado é a grande responsável pelo fenômeno, pois aumenta a porosidade do concreto e também aumenta sua deformabilidade. Essa diminuição do módulo de elasticidade se dá de forma proporcional ao aumento da quantidade de agregado reciclado (BRITO; ROBLES, 2010).

Li (2004) analisou o comportamento do módulo de elasticidade em função dos teores de substituição de agregado reciclado de concreto (Figura 7). Segundo ele, ocorre uma diminuição de forma linear do módulo de elasticidade, até os 25% de substituição. O concreto que apresentou menor módulo de elasticidade foi o com 100% de agregados reciclados, com uma diminuição de 45% em relação ao concreto de referência.

Figura 7 – Módulos de elasticidade para concretos com agregados reciclados. Fonte: Li (2004)



Evangelista e Brito (2007), em seu estudo, também verificaram uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor de agregado fino reciclado. O concreto de referência obteve um módulo de elasticidade de 35,5 GPa, enquanto o concreto com 30% de agregado fino reciclado obteve 34,2 GPa – diminuição de 3,7% - e o concreto com 100% obteve 28,9 GPa – diminuição de 18,5% em relação ao concreto de referência.

Exteberria *et al.* (2007) verificaram um acréscimo no módulo de elasticidade, para os concretos com 25% e 50% de agregado reciclado. O concreto com 25% de agregados reciclados obteve 2,21% e de 50% obteve 1,17% de acréscimo de módulo de elasticidade em relação ao concreto de referência. O concreto com 100%, entretanto, obteve uma diminuição da ordem de 15% do concreto com 100% de agregados graúdos reciclados. Os dados estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Módulos de elasticidade aos 28 dias. Fonte: Exteberria et al. (2007)

Teor de substituição	Módulo de elasticidade aos 28 dias (MPa)
0 %	32.129
25%	32.840
50 %	32.505
100%	28.635

Na pesquisa de Soares *et al.* (2014) foi verificada também uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor de agregado reciclado (Tabela 7). Entretanto, o concreto com 100% de agregado reciclado, onde foi utilizado superplastificante e a relação a/c foi

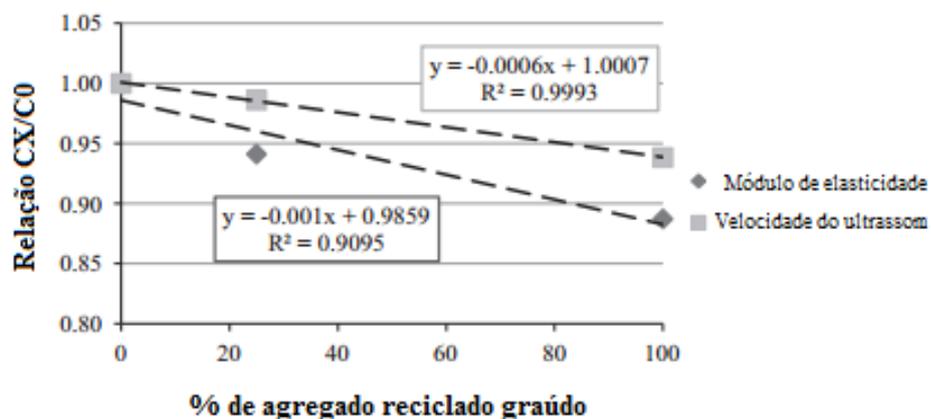
diminuída, obteve-se um módulo de elasticidade maior aos demais, inclusive em comparação com o concreto de referência (0% de agregado reciclado).

Tabela 7 – Módulos de elasticidade com utilização de agregado graúdo reciclado e superplastificante.
Fonte: Soares *et al.* (2014)

Teor de substituição (%)	Relação a/c aparente	Consumo de superplastificante (kg/m ³)	Módulo de elasticidade (GPa)
0	0,55	0	36,2
25	0,55	0	34,1
100	0,55	0	32,1
100	0,40	3,50	39,5

Soares *et al.* (2014) também estudaram a hipótese de que o decréscimo dos valores do módulo de elasticidade e da velocidade da onda ultrassônica foi proporcional à quantidade de agregados reciclados no concreto (Figura 8). A relação CX/C0 é a proporção entre o valor da propriedade do concreto com agregado reciclado em relação ao concreto sem agregado reciclado. Conclui-se que houve uma tendência linear de decréscimo, com bons coeficientes de determinação, onde os valores da velocidade da onda obtiveram um $R^2 = 0,9993$ e os do módulo de elasticidade obtiveram um $R^2 = 0,9095$. Tais propriedades obtiveram uma queda dos valores porque a presença de agregados reciclados no concreto contribui para o aumento do número de vazios, e conseqüentemente a velocidade da onda diminui. Além disso, o aumento dos vazios potencializa a queda da massa específica do concreto, e conseqüentemente, de sua rigidez e do seu módulo de elasticidade.

Figura 8 – Linearidade da queda dos valores de módulo de elasticidade e velocidade da onda em relação à quantidade de agregados reciclados no concreto. Fonte: Soares *et al.* (2014)



2.3.2.3 Esclerometria

Durante o estudo das anomalias de estruturas de concreto, é necessária a utilização de métodos não destrutivos. Um deles é o ensaio de esclerometria, que avalia a dureza superficial do concreto por meio do esclerômetro de reflexão, que se baseia no princípio do ricochete. Essa avaliação possibilita a avaliação da homogeneidade da estrutura, avaliando a qualidade do concreto. Também possibilita a diminuição da moldagem de corpos de prova, por ser um método não destrutivo. Na Tabela 8, observa-se uma classificação qualitativa quando ao índice esclerométrico médio (Ie).

Sampaio (2013) realizou ensaios de esclerometria em corpos de prova de concreto com e sem agregados reciclados. O autor obteve índice esclerométrico médio de 29 para concretos com 0% e 100% de substituição e 27 para o concreto com 50% de substituição.

Tabela 8 – Qualidade do concreto pelo índice esclerométrico média. Fonte: Chefdiville *apud* Pitan (2013)

Índice esclerométrico médio (Ie)	Qualidade da estrutura de concreto
> 40	Boa, superfície dura
30 – 40	Satisfatória
20 – 30	Ruim
< 20	Fissuras/ Concreto solto à superfície

2.3.2.4 Absorção de água

Resultados de ensaios de absorção em pesquisas com concretos com agregados reciclados são semelhantes, ou seja, mostram um aumento da absorção de água por imersão numa relação proporcional com o aumento do teor de agregado reciclado (GONÇALVES *et al.*, 2001; OLORUNSONGO; PADAYCHE, 2002; AMORIM *et al.*, 2012 *apud* SOARES *et al.*, 2014).

Isso se dá pelo aumento da relação a/c, redução da densidade e aumento da permeabilidade por parte dos concretos com agregados reciclados (CARRIJO, 2005; FONSECA, 2006; LOVATO, 2007).

A presença de argamassa aderida ao agregado reciclado confere ao mesmo características de maior absorção, quando comparado ao agregado natural. Estas características são repassadas a nova matriz de concreto confeccionada com o material (GONÇALVES, 2011).

Pérez-Benedicto *et al.* (2012) utilizou teores de substituição de 0%, 50% e 100% de brita natural pela brita reciclada de concreto e manteve uma relação a/c de 0,44. Realizando as substituições em concretos de 40 MPa, ele observou que houve uma diminuição da absorção do concreto com 50% de brita reciclada, mas o concreto com 100% obteve uma absorção maior que o concreto com 0%; para os traços de 50 MPa, houve um aumento linear da absorção à medida que se aumentou o teor de brita reciclada.

Soares *et al.* (2014) avaliou a absorção por imersão de corpos de prova de concretos, com teores de substituição em 0%, 25%, 100% e 100% com superplastificante (Tabela 9). Ele encontrou que a absorção aumentou proporcionalmente ao aumento de agregado reciclado, com exceção do último traço, pois a relação a/c foi diminuída devido ao uso de superplastificante.

Tabela 9 – Absorção por imersão em concretos com agregados reciclados. Fonte: Soares et al. (2014)

Teor de substituição (%)	Relação a/c aparente	Consumo de superplastificante (kg/m³)	Absorção por imersão (%)
0	0,55	-	14,2
25	0,55	-	15,5
100	0,55	-	18,0
100	0,40	3,50	13,7

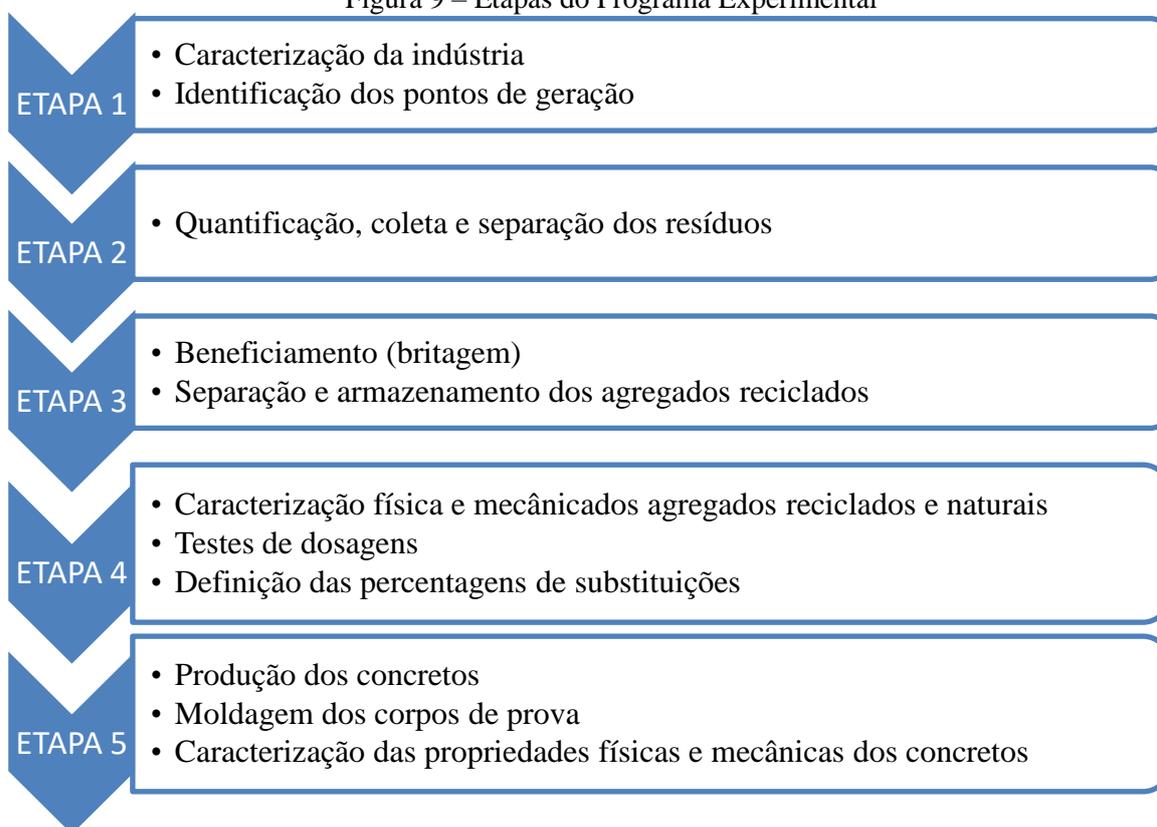
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

O programa experimental da pesquisa foi desenvolvido com o intuito de utilizar os resíduos de artefatos de concreto de uma indústria de pré-fabricados de concreto como agregado fino reciclado para a produção de novos concretos, comparando as propriedades dos mesmos com o concreto de agregado natural produzido na empresa.

Foram definidas cinco etapas no programa experimental (Figura 9). A primeira etapa consistiu na caracterização da empresa e identificação dos pontos de geração de resíduos. A segunda etapa correspondeu à quantificação e coleta dos resíduos, e armazenamento para o processo de britagem. Na terceira etapa, foram feitos a britagem e o armazenamento dos materiais. Na quarta, foram realizados testes dos traços de concretos com 0%, 30%, 50% e 100% de substituição pelos agregados reciclados, e também ensaios de caracterização com os agregados naturais e reciclados. A última e quinta etapa consistiu na produção de concreto, moldagem dos corpos de prova e o estudo do comportamento no estado fresco e endurecido dos diferentes traços de concreto produzidos, após estabelecer os teores de substituição.

Figura 9 – Etapas do Programa Experimental

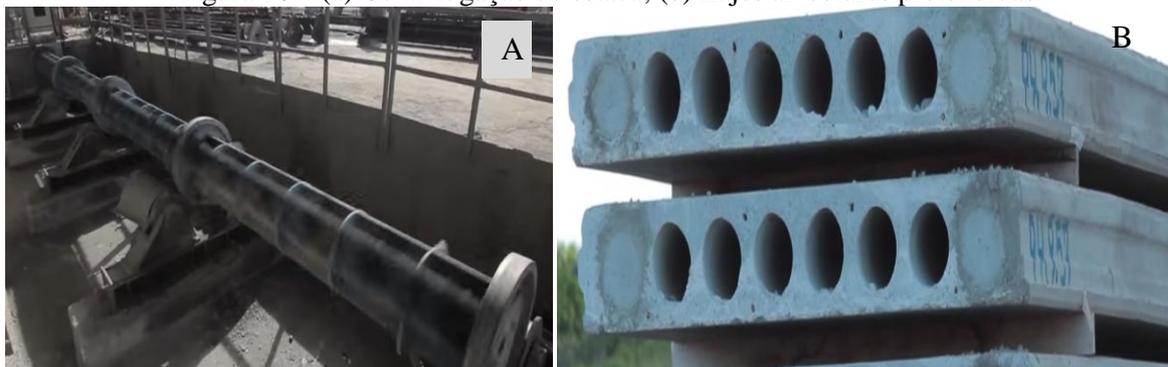


3.2 Caracterização do processo produtivo

3.2.1 Introdução

A indústria de pré-fabricados de concreto fica situada no Complexo Portuário de Suape, Município do Cabo de Santo Agostinho, Estado de Pernambuco, e produz vários tipos de peças diferentes: vigas, pilares, estacas protendidas, estacas centrifugadas (Figura 10a), escadas e lajes alveolares protendidas (Figura 10b). Iniciou suas atividades no ano de 2011 e atua em diversos ramos da engenharia civil: obras comerciais, industriais, de incorporação e de infraestrutura e está presente desde o planejamento da obra até a etapa de montagem dos pré-fabricados. A fábrica tem uma capacidade para produção de peças de concreto de até 4.000 m³ por mês.

Figura 10 – (a) Centrifugação de estaca; (b) Lajes alveolares protendidas.



As dependências da indústria são dispostas de estacionamento externo, escritório, refeitório, almoxarifado, zona de produção, usina de concreto, laboratório de controle tecnológico de concreto, baias de agregados naturais, almoxarifado, armazenamento de peças e um espaço para armazenamento de resíduos de concreto (Figura 11). Identifica-se a zona de produção e concretagem dos pré-fabricados, a central de concreto e o laboratório como os pontos de geração de resíduos (PGR). A zona de produção é o setor responsável pela maior parte dos resíduos gerados.

O processo de produção depende do tipo de peça a ser confeccionada. Vigas e estacas são produzidas por concretagem, e as vigas podem ser protendidas ou não. As lajes alveolares são produzidas por um processo de extrusão, e depois são protendidas. As estacas podem ser concretadas e protendidas ou centrifugadas.

A fábrica também possui um laboratório tecnológico de concreto onde se faz um rigoroso controle tecnológico do concreto produzido na usina. São coletadas amostras para cada traço

produzido diariamente, onde imediatamente é avaliada a trabalhabilidade e depois são moldados corpos de prova para ensaios de resistência à compressão simples às 18 horas, aos 7 dias e 28 dias após a moldagem. Também são realizados ensaios diários de umidade, e ensaios semanais de granulometria e massa unitária.

Figura 11 – Layout da fábrica. Fonte: Adaptado de Google Maps (2016)



Legenda: PGR (Ponto de Geração de Resíduos)

3.2.2 Geração de resíduos

A geração dos resíduos na fábrica se dava de duas formas. A primeira, devido à desaprovação por parte do sistema de qualidade pelo fato de apresentar algum defeito como fissuras, excesso de “ninhos” de concretagem ou até resistência de projeto não atingida. A outra forma

de geração ocorria pelo próprio processo produtivo, na qual havia uma sobra de concreto, cujo volume de perda variava com o tipo de concretagem (Figura 12).

Figura 12 – Sobra de concreto pelo processo de extrusão (laje alveolar)



As peças que eram reprovadas eram trituradas com ajuda de uma máquina (Figura 13a). As peças inteiras eram fragmentadas em pedaços, que viabilizava o transporte dos resíduos para outro local (Figura 13b).

Figura 13 – (a) Trituração das peças; (b) Resíduos após a trituração.



Desde o início da operação da fábrica, os resíduos eram transportados até um pátio na sua parte posterior, e depois amontoados em pilhas, com uma granulometria que só permitia sua utilização em aterros. Deste modo, a fábrica utilizou parte destes resíduos em um aterro para ampliação do terreno de armazenamento dos pré-fabricados, que fica do lado do estacionamento, na parte exterior da fábrica.

A quantificação da geração de resíduos foi realizada nesta pesquisa, baseando-se na produção mensal de concreto da indústria, durante o período de Junho de 2015 a Junho de 2016. Para cada tipo de produção foi atribuído um valor de geração de resíduos, baseado nas medições do

setor de qualidade da empresa (Quadro 1). Tais estimativas referem-se somente à zona de produção, que é o principal gerador de resíduos da indústria.

Quadro 1 – Percentuais de geração de resíduo da empresa

Tipo de produção	Peças produzidas	Parâmetro de consistência	Porcentagem de geração de resíduo por m³ (%)
Concretagem	Vigas, pilares, estacas prismáticas	Slump test 22 ± 2 cm ou espalhamento > 60 cm (auto-adensável)	2,0
Extrusão	Lajes alveolares	Consistência seca	5,0
Centrifugação	Estacas cilíndricas	-	1,0

Na Tabela 10 e na Figura 14 estão expostos os dados de estimativas de geração de resíduos da indústria. No Apêndice A, página 114, a Tabela A.1 mostra os dados detalhados da geração de resíduos por tipo de concreto, com seus respectivos índices de perda. Nota-se que entre Julho/2015 e Novembro/2015 houve uma produção superior a 12 mil m³, então consequentemente, a maior quantidade de resíduos gerados na indústria foi neste mesmo período, correspondendo 485,12 m³ (75% do total). O valor médio da razão entre a geração de resíduos foi de 3,16 %, maior que os 1,78% encontrado por Gonçalves (2011).

3.3 Agregado reciclado

3.3.1 Separação e beneficiamento dos resíduos

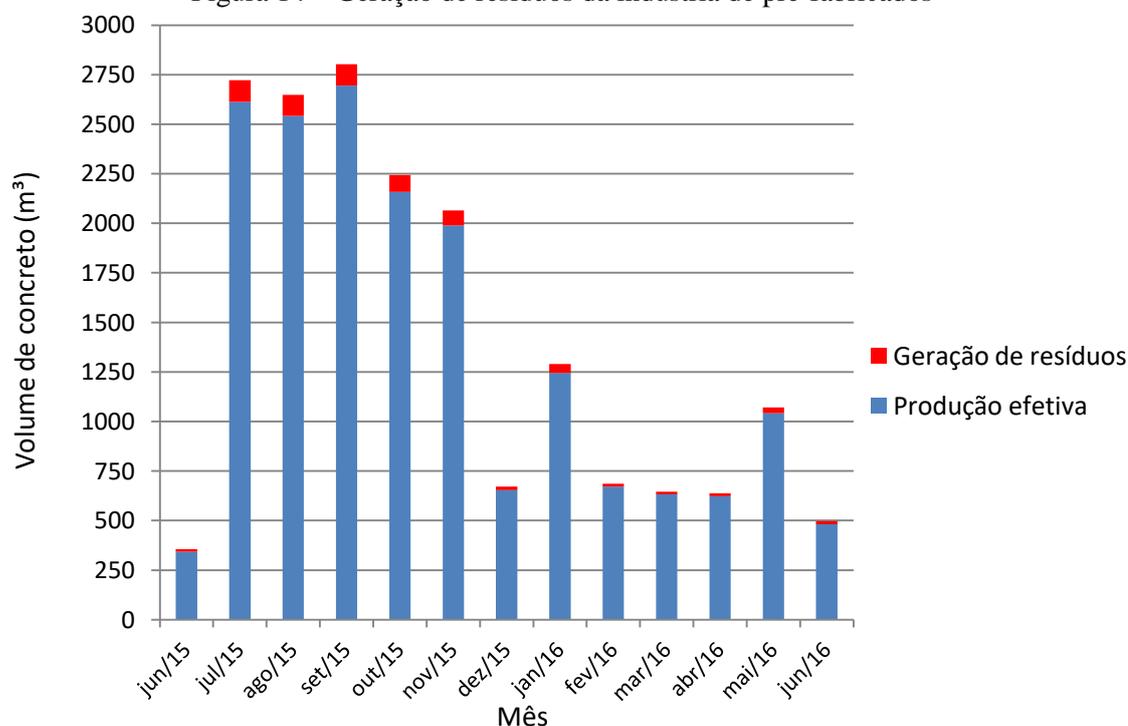
Foram coletados, da pilha de resíduos (Figura 15a), cerca de 5 m³ para beneficiamento e posteriormente serem realizados os ensaios de caracterização e moldagem dos corpos de prova do concreto (Figura 15 b). O material foi coletado conforme recomendação da NBR NM 26:2009 – Agregados – Amostragem.

Depois da separação, o material foi beneficiado por um britador misto de capacidade laboratorial (Figura 16). Ele é composto por um par de mandíbulas que tritura o resíduo, e depois este é beneficiado em granulometrias menores, sob a ação de um martelo. A produção deste tipo de britador é pequena em comparação com britadores de centrais de reciclagem, chegando a cerca de 200 litros, se operado durante todo o dia. Além disso, foi necessário dividir os resíduos em pedaços pequenos, antes de depositá-los no britador, para não danificar o equipamento.

Tabela 10 – Produção de resíduos na indústria de pré-fabricados de concreto

Mês	Produção total (m ³)	Produção efetiva (m ³)	Geração de resíduos (m ³)	Resíduo/ produção total (%)
Junho/2015	355,07	343,04	12,026	3,39
Julho/2015	2722,43	2612,45	109,97	4,04
Agosto/2015	2647,84	2541,93	105,90	4,00
Setembro/2015	2802,74	2694,11	108,62	3,88
Outubro/2015	2243,73	2157,56	86,16	3,84
Novembro/2015	2064,11	1989,65	74,45	3,61
Dezembro/2015	671,49	653,75	17,73	2,64
Janeiro/2016	1289,7	1244,20	45,49	3,53
Fevereiro/2016	685,95	670,66	15,28	2,23
Março/2016	645,26	632,354	12,90	2,00
Abril/2016	637,15	623,47	13,67	2,15
Mai/2016	1070,35	1042,30	28,04	2,62
Junho/2016	497,11	481,60	15,51	3,12
Total	18.332,93	17.687,13	645,80	-
Média	1410,23	1360,55	49,68	3,16

Figura 14 – Geração de resíduos da indústria de pré-fabricados



Figuras 15 a e b – Pilhas de resíduos

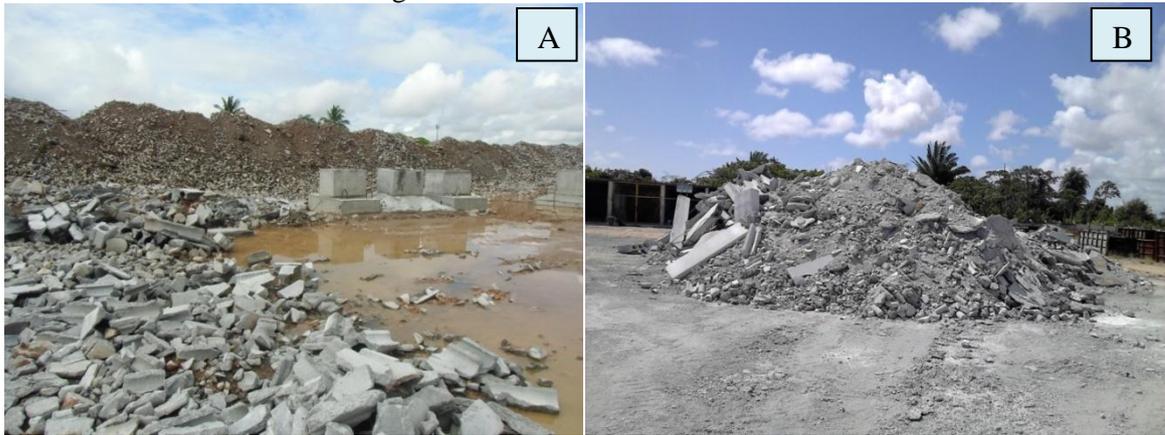
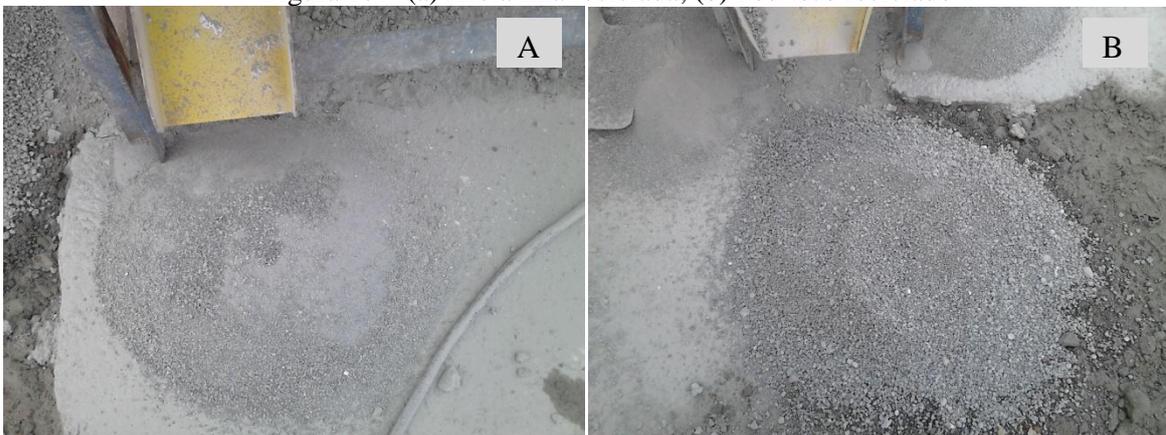


Figura 16 – Britador utilizado na pesquisa



Ao final do processo, obtiveram-se duas granulometrias de agregados reciclados: um com dimensão fina, semelhante a uma areia fina (Figura 17a), com diâmetro máximo de \varnothing 2,4 mm e outro com granulometria maior, semelhante a um pedrisco (Figura 17b), com diâmetro máximo de \varnothing 6,3 mm.

Figura 17 – (a) Areia fina reciclada; (b) Pedrisco reciclado



No caso do pedrisco reciclado, foi realizado um peneiramento em malha de diâmetro de 4,8 mm (Figura 18), separando o material passante na peneira. Nesta pesquisa utilizou-se, para os Traços 1, 2 e 3, utilizou-se apenas o agregado reciclado miúdo, ou seja, o agregado reciclado cuja sua maior fração granulométrica se localize abaixo do diâmetro de 4,8 mm.

Figura 18 – Peneiramento de agregado reciclado



Após a definição das granulometrias a serem utilizadas, os agregados reciclados foram secos ao ar e depois foi realizada a redução da amostra para os ensaios de laboratório, através do quarteamento. Em seguida, os agregados reciclados foram armazenados em sacos de 50 cm x 80 cm x 18 mm para a realização dos ensaios de caracterização e depois para a confecção dos concretos e moldagem dos corpos de prova. Os sacos foram pesados, cada um com 20 kg de agregado (Figura 19a), e depois lacrados e conduzidos para um local no interior do laboratório da indústria (Figura 19b).

A quantidade de agregados reciclados seguiu como estimativa a quantidade em litros de concreto presente no corpo de prova, ou seja, 10 cm x 20 cm. Estimando-se uma quantidade na ordem de 450 corpos de prova, obteve-se 720 litros de concreto. Daí então, foi considerado que 70 % da massa do concreto é composta por agregados. Como o objetivo da pesquisa foi utilizar somente agregados miúdos reciclados, verificou-se os traços que seriam utilizados nas substituições. No primeiro traço, os agregados miúdos correspondiam a 54% do total de agregados. No segundo traço, 52% do total de agregados. Como seriam realizadas substituições em 0%, 30%, 50% e 100%, fixou-se um valor médio de substituições em 50%.

Figura 19 – (a) Pesagem dos sacos; (b) armazenagem dos agregados reciclados.



A quantidade total de agregados, em massa, foi calculada em torno de 315 kg para as três granulometrias estudadas. Foram produzidos, ao final, cerca de 500 kg de agregados reciclados. Com essa diferença foi possível a realização de testes preliminares com o concreto e também foi importante para dar margem à segurança, para caso alguma concretagem tivesse sido mal executada, e então o concreto tivesse que ser descartado.

3.4 Agregados naturais

Os agregados naturais foram coletados diretamente nas baias da fábrica, que ficam dispostas ao lado da usina de concreto. Estes são os mesmos agregados que a fábrica utiliza na produção de concreto: areia fina, brita 12 e a brita 19. Eles são oriundos de uma jazida localizada no bairro da Muribeca, no município de Jaboatão dos Guararapes – PE.

O material necessário para os ensaios de caracterização e moldagem dos corpos de prova para os ensaios em concreto também seguiu a base de cálculo utilizada para agregados reciclados e ficou em torno de 600 kg para os agregados graúdos naturais e 450 kg para os agregados miúdos.

Os agregados foram separados nas baias, e colocados próximos ao laboratório. À medida que iam sendo feitas as concretagens para o programa experimental, os agregados eram trazidos para o interior do laboratório e secados ao ar (Figura 20). Havia um controle de umidade dos materiais, que garantia que ela não ultrapasse 3%.

Figura 20 – Agregados no interior do laboratório



3.5 *Aglomerante*

Para a produção de concreto, utilizou-se nesta pesquisa o mesmo aglomerante utilizado na fábrica: o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI). Este tipo de cimento é o mais utilizado nas empresas de pré-fabricados, pois este possibilita a rápida liberação das peças pré-fabricadas para o local da obra, diminuindo os espaços da empresa com estoques e aumentando a produtividade da fábrica.

Foram necessários cerca de 500 kg de cimento para a todo o programa experimental. Eles foram coletados na central de armazenamento de cimento. As informações do cimento foram fornecidas pelo fabricante e estão disponíveis na Tabela 11.

3.6 *Superplastificante*

Na pesquisa, foi utilizado o mesmo superplastificante para concretos e argamassas que é usado na indústria de pré-fabricados. A utilização de superplastificantes em concretos possibilita o aumento da trabalhabilidade do concreto sem precisar aumentar a relação a/c. Desta forma, pode-se obter concretos de alta resistência e também de alta trabalhabilidade. As especificações do superplastificante se encontram no Quadro 2. Nota-se que o cimento alcançou 58 MPa de resistência à compressão simples aos 28 dias, o que influenciou as propriedades de resistência dos concretos produzidos com ele.

Tabela 11 – Propriedades do cimento CP V – ARI utilizado na pesquisa

Ensaio				
Ensaio				
Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Resíduo Insolúvel	ABNT NM 15/12	%	0,83	≤ 1,0
Perda ao Fogo	ABNT NM 18/12	%	2,45	≤ 4,5
Óxido de Magnésio	ABNT NM 14/12	%	1,16	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre	ABNT NM 16/12	%	3,25	≤ 4,5
Anidrido Carbônico	ABNT NM 20/12	%	1,85	≤ 3,0
Ensaio				
Ensaio				
Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Área Específica	ABNT NM 76/98	cm ² /g	4.620	≥ 3.000
Massa específica	ABNT NM 23/01	g/cm ³	3,13	NA
Índice de finura (# 75 µm)	ABNT NBR 11579/13	%	0,07	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325	ABNT NBR 9202/85	%	1,00	NA
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	29,5	NA
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	177	≥ 60
Fim de pega	ABNT NM 65/04	minutos	237	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/12	mm	0,10	≤ 5,0
Ensaio				
Ensaio Mecânicos - ABNT NBR 7215/96				
Ensaio	Unidade	Desv. Pad.	Resultado	Exigência
Resistência à comp. - 1 dia	MPa	1,72	29,5	14,0
Resistência à comp. - 3 dias	MPa	2,21	42,2	24,0
Resistência à comp. - 7 dias	MPa	1,41	50,4	34,0
Resistência à comp. - 28 dias	MPa	0,62	58,0	NA

Legenda: NA - não aplicável

*Dados fornecidos pelo fabricante

Quadro 2 – Especificações do superplastificante utilizado na pesquisa

Especificação	Superplastificante MC Bauchemie Power Flow 3100
Densidade	1,07 g/cm ³
Dosagem recomendada	0,2 a 5,0 % sobre o peso do cimento
Estado	Líquido
Cor	Marrom

*Dados fornecidos pelo fabricante

3.7 Ensaio de caracterização física e mecânica dos agregados

Os ensaios de caracterização dos agregados naturais e reciclados foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Universidade de Pernambuco (UPE), no Laboratório de Tecnologia de Concreto (LTC) da indústria onde a pesquisa foi desenvolvida e no Laboratório de Construção Civil da Universidade Católica de Pernambuco (LCC/UNICAP).

O Quadro 3 indica um resumo dos ensaios de caracterização dos agregados realizados nos agregados naturais graúdos e miúdos e nos agregados reciclados, segundo critérios da ABNT.

Quadro 3 – Ensaio realizados nos agregados

Norma	Ensaio	Agregados			Local do ensaio
		Miúdo		Graúdo	
		Natural	Reciclado	Natural	
ABNT NM 248:2003	Composição granulométrica	X	X	X	LTC (indústria)
ABNT NM 46:2003	Material pulverulento	X	X	X	LMC (UPE)
ABNT NM 45:2006	Agregados – massa unitária e volume de vazios	X	X	X	LTC (indústria)
ABNT NM 52:2002	Agregado miúdo – massa específica	X	X		LMC (UPE)
ABNT NM 30:2001	Agregado miúdo – absorção de água	X	X		LMC (UPE)
ABNT NM 53:2009	Agregado graúdo - massa específica e absorção de água			X	LMC (UPE)
ABNT NM 51:2001	Abrasão Los Angeles			X	LCC (UNICAP)

3.7.1 Análise granulométrica

Os ensaios de granulometria dos agregados naturais e reciclados foram realizados de acordo com a norma NBR NM 248:2003 (Agregados – Determinação da composição granulométrica).

Utilizou-se cerca de 3 kg para a realização dos ensaios nos agregados miúdos e 6 kg para os agregados graúdos. Após os agregados serem secos em estufa, à temperatura de 105°C, num intervalo de 24h, as amostras foram retiradas da estufa e esfriaram a temperatura ambiente.

As peneiras de aberturas da malha 19 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 6,3 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 600 µm; 300 µm e 150 µm foram utilizadas. Como as peneiras foram colocadas em um vibrador mecânico (Figura 21), para o agregado graúdo, inicialmente utilizou-se as peneiras de maior abertura de malha, e depois as subsequentes; para o agregado miúdo acoplaram-se as peneiras abertura de 2,36 mm até a de 150 µm.

Figura 21 – Conjunto de peneiras em vibrador mecânico



Após a realização de dois ensaios para cada tipo de agregado, adotou-se a média de cada um como a distribuição granulométrica, para depois serem traçadas as curvas granulométricas. Além das curvas, foram obtidas também a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura de cada agregado.

3.7.2 Teor de material pulverulento

O ensaio de determinação de teor de materiais pulverulentos foi executado de acordo com a norma NBR NM 46:2003 – Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 μm por lavagem.

Utilizou-se cerca de 500 g para agregados miúdos e 3000 g para os agregados graúdos. Após secos em estufa, os agregados foram colocados em um recipiente transparente, e então a água foi adicionada. A mistura foi agitada e passada imediatamente através das peneiras de abertura de malha 1,18 mm e 75 μm , a fim de que passasse a água junto com os finos de tamanho menor que 75 μm . O que ficava retido era adicionado novamente ao recipiente com a amostra e o agregado era lavado até que água da mistura ficasse com transparência próxima à água padrão.

Ao final, o agregado lavado foi levado para a estufa a temperatura de 105°C por 24 h. Calculou-se o teor de material pulverulento com a massa seca inicial da amostra e a massa seca após a lavagem. O ensaio foi repetido três vezes em cada agregado, e o teor de material pulverulento foi obtido através da média dos três ensaios.

3.7.3 Massa unitária

O ensaio de determinação da massa unitária dos agregados naturais e reciclados foi realizado de acordo com a norma NBR NM 45:2006 – Agregados: Determinação da massa unitária e volume de vazios. A amostra necessária para este ensaio corresponde a aproximadamente 150% a mais da quantidade necessária para encher o recipiente que será utilizado no ensaio, para que haja material suficiente para seu transbordamento.

O procedimento realizado está descrito como método “C” na norma da ABNT, com o material sendo seco ao ar. Coloca-se o agregado com uma concha num recipiente cilíndrico, de volume e peso conhecidos, até transbordar (Figura 22a). O material deve ser colocado no recipiente numa altura inferior a 50 cm, para não haver segregação. Depois, realiza-se o nivelamento com uma régua metálica, retirando o material em excesso (Figura 22b) e pesa-se o recipiente com o agregado. A massa unitária será a relação entre o peso do agregado (sem o recipiente) e o volume do recipiente.

Figura 22 – (a) e (b) Nivelamento do agregado no recipiente; (c) Pesagem do conjunto agregado e recipiente.



3.7.4 Absorção e massa específica de agregado miúdo

A realização do ensaio de absorção do agregado miúdo foi realizada em conformidade com a norma NBR NM 30:2001 (Agregado miúdo – Determinação da absorção de água), que estabelece o método para absorção de agregados miúdos pela condição saturada superfície seca dos agregados.

Inicialmente, colocam-se os agregados em estufa até a constância da massa, e então os agregados secos são colocados submersos em um recipiente com água, por 24 horas (Figura 23a). Após esse tempo, as amostras são submetidas à uma fonte de ar quente, como um secador (Figura 23 b). À medida que a água vai sendo retirada, os agregados são colocados em um molde de tronco de cone e levemente compactados, até que, no momento da retirada do molde, os agregados não se desagreguem (Figura 23 c). Quando chegar esse momento, os agregados estão na condição saturada superfície seca. Pesa-se então os agregados nesta condição, e os colocam em estufa novamente. A absorção será calculada pela diferença entre as massas dos agregados na condição saturada superfície seca e na condição seca, dividido pela massa na condição seca, em porcentagem.

Figura 23 – (a) Agregados submersos em água; (b) Secagem dos agregados com secador; (c) Verificação da condição saturada superfície seca



O procedimento do ensaio de determinação da massa específica foi feito em conformidade com a norma NBR 52:2009 (Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente). O ensaio foi realizado imediatamente após o ensaio de absorção, pois o agregado deve estar na condição saturada superfície seca. Colocou-se 500 g de agregado nesta condição em um frasco aferido, de capacidade de 500 cm³, e pesou-se o conjunto. Depois, foi colocada água até deixar o agregado submerso, e então o frasco foi agitado até a expulsão do ar. Após uma hora, a água foi preenchida até a marca de 500 cm³, e a massa do conjunto foi determinada. Logo após, o agregado foi retirado e colocado em estufa a temperatura de 105°C até constância da massa. Após isso, foi determinada a massa específica do agregado miúdo.

3.7.5 Absorção e massa específica do agregado graúdo

O procedimento de ensaio utilizado para a obtenção dos valores de absorção e massa específica de agregado graúdo foi a norma NBR NM 53:2009 (Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção).

Após secos em estufa, os agregados graúdos foram lavados e submersos dentro de um recipiente com água, por 24 horas. Saturados, os agregados foram retirados do recipiente (Figura 24a) e enxugados com auxílio de um pano seco, para que eles atingissem a condição saturada superfície seca. Imediatamente, os agregados foram pesados e depois colocados em um cesto submerso em água, ligado a uma balança hidrostática (Figuras 24a e 24b). Foi então determinada a massa do agregado submerso em água. Após esta etapa, o agregado graúdo foi colocado para secar em estufa a 105°C, e foi determinada sua massa na condição seca. Os valores de absorção dependem de relações entre a massa do agregado na condição seca, saturada superfície seca e saturada.

Figura 24 – (a) Agregados saturados; (b) Agregados colocados em cesto ligado à balança hidrostática.



3.7.6 Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão mede a resistência ao desgaste superficial dos grãos do agregado quando é submetido ao atrito. Assim, determina-se a resistência à fragmentação do agregado por choque ou atrito das partículas do agregado graúdo, ou seja, sua capacidade de não se desagregar quando manipulado, o que pode diminuir seu diâmetro.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR NM 51:2001 (Ensaio de Abrasão “Los Angeles”). Após a correção granulométrica determinada na norma, o agregado graúdo foi seco em estufa e sua massa foi determinada. Após isso, o agregado foi colocado em um tambor cilíndrico (Figura 25 a), junto com as esferas de chumbo, cuja quantidade depende da fração granulométrica descrita na norma.

A máquina Los Angeles é ligada a rotação de 30 rpm, e então as esferas de chumbo começam a se chocar com o agregado graúdo. Após 500 rotações, o agregado é retirado (Figura 25 b) do tambor junto com as esferas. O agregado é lavado, passando pela peneira #1,70 mm (Figura 25 c), e o material retido é colocado para secar em estufa, a 105°C, até a constância da massa. A abrasão será medida entre a diferença da massa inicial e a massa após o ensaio de abrasão dividido pela massa seca inicial.

Figura 25 – (a) Tambor da máquina de abrasão; (b) Agregados após o ensaio; (c) Lavagem dos agregados na peneira de malha #1,70 mm



3.8 *Dosagem experimental*

As pesquisas sobre concretos produzidos com agregados reciclados têm adotados métodos variados. Alguns autores criaram traços a partir de métodos consagrados, como o do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) ou o da ABCP (RODRIGUES, 2011; CAVALCANTI, 2014) e depois realizaram as substituições pelos agregados reciclados. Outros apenas adotaram percentuais de substituição em traços já originalmente adotados pela concreteira ou indústria (PEREZ-BENEDICTO *et al.*, 2011; SOARES *et al.*, 2014). Para este programa experimental, tentou-se adotar um método que pudesse ser colocado em prática pela indústria

Para isso, foram utilizados traços que vem sendo empregados na produção de concretos de peças pré-fabricadas. A partir da escolha dos traços, foram escolhidos os teores de substituições de agregados naturais pelos agregados reciclados. Como a indústria trabalha com produção de concreto com traços em massa, então as substituições adotadas também foram em massa.

Outro aspecto importante na dosagem foi a trabalhabilidade. Como a ideia foi se adequar à realidade da fábrica, caso a relação *a/c* fosse mantida, com o aumento da percentagem de agregados reciclados, a trabalhabilidade seria muito afetada, e isso poderia se tornar inviável o uso do concreto com essas características na pré-fabricação. Devido a esse fator, o abatimento foi mantido, e a relação *a/c* variou.

3.8.1 *Definição dos traços e substituições*

Dois traços originais utilizados pela indústria de pré-fabricados foram utilizados para o programa experimental: um para a produção de vigas, pilares e estacas pré-moldadas, por meio de concretagem (Traço C1); e outro, com consistência seca, para a produção de lajes alveolares, pelo processo de extrusão (Traço C2), como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Traços originais do programa experimental

Grupo do concreto	Traço unitário em massa (cimento: areia: brita 12: brita 19)	Consumo de cimento (Kg/m ³)	Relação a/c	Consumo de aditivo (% da massa de cimento)	Abatimento de tronco de cone (mm)	Resistência característica aos 28 dias (MPa)
C1	1: 1,99: 0,59: 1,09	485	0,36	0,6	230 ± 20	45
C2	1: 2,80: 2,54: 0	367	0,39	0,4	0	35

Inicialmente, decidiu-se realizar substituições em massa de 30%, 50% e 100% de agregado fino reciclado apenas no traço C1. Para ajustar o consumo de água à trabalhabilidade, foram feitos testes iniciais com o concreto, onde foram adicionadas quantidades de água durante a betonada até que o concreto atingisse uma trabalhabilidade de 230±20 mm. Nas duas primeiras substituições (30% e 50%), isso conseguiu ser feito. Entretanto, na substituição de 100%, mesmo aumentando a quantidade de água, o abatimento não conseguiu ser diferente de zero (Figura 26). Deste modo, tentou-se adicionar mais aditivo superplastificante ao concreto, com o objetivo de melhorar sua consistência e torná-lo trabalhável. Entretanto, mesmo melhorando seu desempenho quanto ao abatimento, o concreto ficou difícil de ser manuseado, ficando com uma alta viscosidade, chamada informalmente de consistência “liguenta”, e assim a possibilidade de se utilizar 100% de agregados reciclados neste traço foi descartada.

Figura 26 – Concreto com 100% de agregados finos reciclados



Teve-se então a ideia de utilizar um traço com um concreto seco, que pudesse receber 100% de agregados reciclados. O traço C2, que é utilizado para lajes alveolares, foi então o escolhido para tal.

Após a realização dos testes, foram definidos os traços a serem produzidos, com suas respectivas relações a/c e relações água/materiais secos (Tabela 13). Nela estão as porcentagens em massa dos agregados utilizados na pesquisa, tais como: AFN (areia fina natural), BN 12 (Brita natural de DMC = 12,5 mm), BN 19 (Brita natural de DMC = 19,0 mm), AFR (areia fina reciclada), AR 4,8 (agregado reciclado de DMC = 4,8 mm) e AR 6,3 (agregado reciclado de DMC = 6,3 mm). Uma tabela com o detalhamento dos traços utilizados na pesquisa está no Apêndice B. Além dessas propriedades, foram mantidos constantes:

- o abatimento de tronco de cone, em 230 ± 20 mm, para o grupo C1;
- o consumo de superplastificante, em 0,6% do consumo de cimento em massa para os concretos tipo C1, e 0,4% para os concretos do tipo C2;
- o teor de argamassa (α), em 0,54 para os concretos do tipo C1, e 0,53 para os concretos do tipo C2.

Tabela 13 – Traços utilizados no programa experimental

Grupo do concreto	Nomenclatura	Porcentagem em relação à massa total de agregado miúdo (%)			Porcentagem em relação à massa total de agregado graúdo (%)			Relação a/c	Relação água/m. secos (%)
		AFN	AFR	AR 4,8	BN 12	BN 19	AR 6,3		
C1	C1-ref	100	0	0	35	65	0	0,360	7,71
C1	C1-30	70	15	15	35	65	0	0,362	7,84
C1	C1-50	50	25	25	35	65	0	0,367	7,86
C2	C2-ref	100	0	0	100	0	0	0,397	6,25
C2	C2-100	0	100	0	0	0	100	0,451	7,12

3.9 Ensaios em concreto

3.9.1 Concreto fresco

Foram realizados dois ensaios com o concreto fresco: o abatimento de tronco de cone, e a determinação de massa unitária. Além disso, também foram moldados os corpos de prova para realização dos ensaios com o concreto endurecido. Todos estes procedimentos foram realizados no laboratório tecnológico de concreto da fábrica de pré-fabricados (LTC).

3.9.1.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone – Slump Test

Logo após a realização da concretagem de cada traço, conforme a Tabela 11, foi o realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone , em conformidade com a norma NBR NM 67:1998 (Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone).

Este ensaio deve ser realizado com o concreto fresco, imediatamente após o mesmo ser retirado da betoneira ao final das rotações. A mistura é colocada em um molde de tronco de cone sobre uma placa metálica umedecida e compactada em três camadas. Após a compactação, o molde é retirado e coloca-se de forma invertida em um canto da placa metálica (Figura 27). O abatimento será a distância da haste colocada em cima do molde até o concreto.

Nos concretos C2-ref e C2-100, que tinham um abatimento nulo, a consistência ideal do concreto para extrusão foi verificada através de uma análise táctil-visual do responsável pela produção de concreto extrudado da indústria.

Figura 27 – (a;b) Retirada do molde; (c) Medição do abatimento de tronco de cone



3.9.1.2 Determinação da massa unitária do concreto fresco

O ensaio de massa unitária foi realizado em cada traço de concreto, logo após o ensaio de abatimento. O concreto fresco foi compactado em um recipiente com volume e peso conhecidos. Após isso, o concreto foi nivelado, com uma régua, e pesado. A relação entre a massa do concreto e o volume ocupado por ele é a massa unitária do concreto fresco (Figura 28).

Figura 28 – Pesagem do concreto fresco no molde para determinação da massa unitária



3.9.1.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Após a realização dos ensaios com o concreto fresco, foram moldados corpos de prova (100 x 200 mm) para a realização dos ensaios com o concreto endurecido. O procedimento seguido está descrito na NBR 5738:2015 (Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova).

A moldagem dos corpos de prova foi feita através do preenchimento do concreto fresco em moldes cilíndricos (Figura 29a). Para os concretos do grupo C1, o preenchimento se deu em duas camadas, cada uma compactada com 12 golpes por uma haste metálica (Figura 29b). Um dia após a moldagem, os corpos de prova eram desformados e colocados em um tanque de cura, descansando até a data final de cura (Figura 29c).

Figura 29 – (a;b) Moldagem dos corpos de prova cilíndricos; (c) Tanque de cura



Nos concretos do grupo C2, o procedimento de moldagem dos corpos de prova foi diferente do grupo C1. Com o concreto seco, não seria possível compactar o concreto apenas dando golpes com uma haste, então o procedimento adotado foi colocar o concreto em três camadas, e compactar cada camada com auxílio de um soquete e uma mesa vibratória, tentando chegar o mais próximo possível da compactação obtida no equipamento extrusor (Figura 30).

Figura 30 – Compactação do concreto seco



O número total de corpos de prova foi determinado a partir do levantamento de corpos de prova necessário para realização de cada ensaio, que está demonstrado na Tabela 14.

Tabela 14 - Quantitativos de corpos de prova por traço e ensaio

Ensaio/Concreto	C1-0	C1-30	C1-50	C2-0	C2-100	Total	Local do ensaio
Resistência à 24 horas	18	18	18	8	8	70	
compressão 7 dias	18	18	18	8	8	70	LTC
axial e 28 dias	18	18	18	8	8	70	(Fábrica)
esclerometria 105 dias	18	18	18	8	8	70	
Absorção	8	8	8	6	6	36	LMC
Módulo de elasticidade estático	5	5	5	5	5	25	TECOMAT
Resistência à tração por compressão diametral	4	4	4	2	2	16	TECOMAT
Módulo de elasticidade dinâmico	18	18	18	8	8	70	LMC
Total	107	107	107	53	53	427	

3.9.2 Concreto endurecido

3.9.2.1 Resistência à compressão axial

Antes do ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova foram retificados, com o objetivo de uniformizar as suas superfícies extremas, deixando-as lisas e garantindo uma maior confiabilidade nos resultados.

O ensaio foi executado de acordo com a NBR 5739/2007 (Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos). As rupturas foram realizadas em uma prensa mecânica, com capacidade máxima de 100 tf (Figura 31).

Para os concretos do grupo C1, foram rompidos 18 corpos de prova de cada família em cada idade (1, 7, 28 e 105 dias) e para os concretos C2-ref e C2-100, o número de corpos de prova rompido foi de 8, por traço e em cada idade. No total, romperam-se 280 corpos de prova, sendo 70 para cada idade.

Figura 31 – Rompimento de corpo de prova



3.9.2.2 Esclerometria

O ensaio de esclerometria avalia a dureza superficial do concreto. Para este ensaio, utilizou-se o esclerômetro Schimdt tipo N, devidamente calibrado. Foram realizadas 16 leituras em cada corpo de prova.

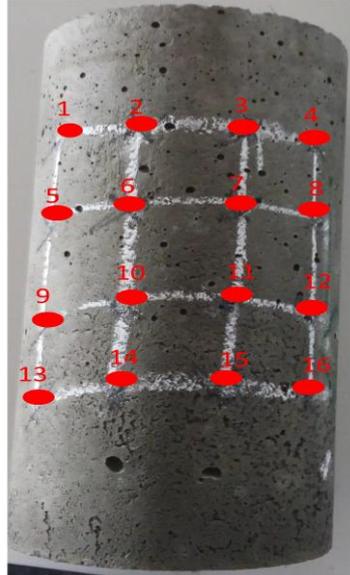
Antes do corpo de prova ser rompido à compressão, o colocou-se na prensa, submetendo-o a uma compressão entre 4 e 6 tf, e então o ensaio de esclerometria foi realizado. O esclerômetro foi aplicado na parte lateral do corpo de prova, como mostra a Figura 32.

Figura 32 – Aplicação do esclerômetro no corpo de prova



Desta forma, antes de iniciar o ensaio, foram definidos, em cada corpo de prova, os pontos que seriam submetidos ao ensaio de esclerometria, de acordo com a Figura 33.

Figura 33 – Pontos do corpos de prova do ensaio de esclerometria



Segundo a NBR 7584:2012 – Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – os valores dos pontos que estiverem fora do intervalo de 10 % a mais ou a menos da média aritmética de todos os pontos devem ser desconsiderados, e uma nova média deve ser calculada, até que no final todos os índices esclerométricos individuais se estabeleçam dentro desse intervalo. Um quadro modelo foi feita com o objetivo de servir de base para o preenchimento dos dados do ensaio, que estão detalhados no Apêndice D.

O Quadro 04 mostra um exemplo de formulário utilizado no preenchimento dos dados do ensaio. Neste exemplo, os pontos 2 e 7 foram eliminados na primeira média, e o resultado do ponto 10 foi excluído no cálculo da segunda média.

Quadro 04 – Tabela para preenchimento dos dados do ensaio de esclerometria

N° CP	Resist. comp. (KG)		Resist. comp. (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	1	2	3	4	1ª média:
	5	6	7	8	
	9	10	11	12	2ª média (se houver):
	13	14	15	16	

Legenda: ■ Resultados eliminados no primeiro cálculo da média;

■ Resultados eliminados no segundo cálculo da média.

3.9.2.3 Absorção de água e massa específica

Os procedimentos utilizados no ensaio de absorção de água estão descritos na NBR 9778:2005 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

Inicialmente, os corpos de prova foram colocados em estufa para a obtenção de seus respectivos pesos secos. Depois de pesados, foram feitas, com giz de cera, duas demarcações nos corpos de prova, dividindo-o em três terços (Figura 34a). Nas primeiras quatro horas, 1/3 de seu volume ficou submerso (Figura 34b), e então foram pesados. Nas quatro horas posteriores, 2/3 do volume foram submersos, e depois foram pesados novamente. Após este processo, eles foram totalmente imersos em um recipiente com água, e então foram feitas aferições de suas massas após 24 horas, 48 horas e 72 horas a partir do momento em que eles foram retirados da estufa. Ou seja, a primeira leitura após os corpos de prova terem ficados totalmente submersos aconteceu 18 horas após o procedimento de imersão de 2/3 do seu volume. Antes de cada medição, os corpos de prova tinham sua superfície enxugada (Figuras 34c e 34d). Com os dados das massas dos corpos de prova após estes intervalos, já foi possível conhecer o valor da absorção de cada um deles.

Após a pesagem dos corpos de prova saturados, eles foram colocados submersos novamente dentro de um cesto metálico, conectado à uma balança hidrostática. O objetivo foi conhecer o peso submerso em água de cada corpo de prova, para o cálculo da massa específica seca, massa específica saturada e índice de vazios.

Figura 34 – (a) Demarcação nos corpos de prova; (b) Submersão parcial em água; (c) Enxugamento de corpo de prova saturado; (d) Pesagem do corpo de prova saturado.





3.9.2.4 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade será realizado de duas formas: pelo método não destrutivo de Benetti (2012), com a utilização de um ultrassom, e pelo método destrutivo.

Os procedimentos para realização do ensaio não destrutivo foram seguidos pelo método de Benetti (2012), com uso de um ultrassom da marca CONTROLS (Figura 35a), específico para medições em concretos. O ultrassom mede o tempo que uma onda percorre de um lado ao outro do corpo de prova (Figura 35b). Com o tempo t (microsegundos), a altura do corpo de prova L (mm), calcula-se a velocidade do corpo de prova V (mm/ μ s ou km/s). Assim, depois de calculada a velocidade, e com a densidade do corpo de prova d (kg/m³), é possível calcular o módulo de elasticidade E_d (GPa). Como não houve a possibilidade de calcular o coeficiente de Poisson μ , então ele foi considerado igual a 0,20, valor que é comumente encontrado na literatura. A fórmula para o cálculo é:

$$E_d = d \times V^2 \times \frac{(1 + \mu) \times (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (\text{Equação 1})$$

Figura 35 – (a) Aparelho de ultrassom utilizado na pesquisa; (b) Medição do tempo de propagação da onda.



O método destrutivo foi realizado de acordo com a Norma NBR 8522:2008 – Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Inicialmente, com auxílio de um paquímetro, todos os corpos de prova devem ter suas medições aferidas. A Norma pede, para cada lote, cinco corpos de prova: os dois primeiros devem ser ensaiados à compressão simples, a fim de se obter uma resistência média do lote; os outros também são submetidos à compressão, entretanto, neste momento, são colocados extensômetros, que ficam acoplados nas laterais do corpos do prova através de um cinto. O ensaio foi realizado com auxílio de extensômetros eletrônicos, também conhecidos como *strain gages* (Figura 36).

Após a preparação dos equipamentos, o corpo de prova está pronto para ser carregado. Existem duas metodologias previstas na NBR 8522 (“A” e “B”), e a metodologia seguida foi a “A”, com as seguintes etapas:

Etapa 1: inicialmente, os corpos de prova foram carregados com 30% da tensão de ruptura obtida (σ_B) a partir da média dos dois corpos de prova ensaiados à compressão simples. Depois de 60s, eles são descarregados até uma tensão próxima de zero.

Etapas 2 e 3: os corpos de prova foram carregados a uma tensão de 0,5 MPa, por 60s, e depois carregados com a tensão de σ_B , por mais 60s. Em seguida, foram descarregados novamente até uma tensão próxima a zero.

Etapa 4: carregaram-se os corpos de prova a uma tensão de 0,5 MPa por 60s, e registraram-se as deformações obtidas nos últimos 30s; depois eles foram carregados na tensão de σ_B por mais 60s, e registraram-se as deformações nos últimos 30s; depois disso, retiraram-se os equipamentos de medição das deformações e o corpo de prova foi rompido. Em seguida, o módulo de elasticidade foi calculado de acordo com as recomendações da NBR 8522:2008.

Figura 36 – Prensa e corpo de prova com *micro-strain gages*

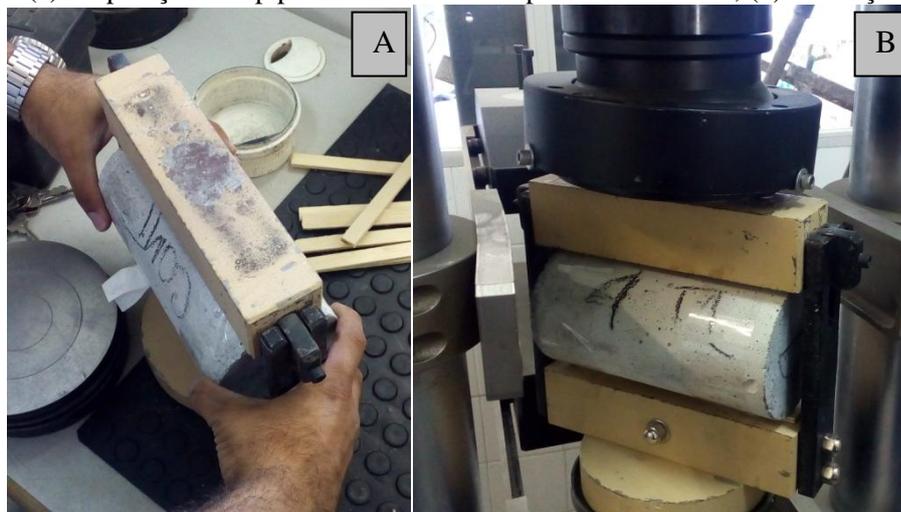


3.9.2.5 Resistência à tração por compressão diametral

A metodologia seguida para a obtenção de valores de resistência à tração será a da NBR 7222:2011 - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (CPs). Os ensaios foram realizados no laboratório da TECOMAT.

De início, com auxílio de paquímetro, os CPs tiveram suas dimensões aferidas. Em seguida, foram acoplados em um prato de máquina de compressão, e foram colocadas tiras de madeira entre o CP e o prato, para garantir que a carga seja distribuída ao longo da geratriz do corpo de prova (Figuras 37a e 37b). Em seguida, os CPs foram submetidos à compressão diametral até o rompimento.

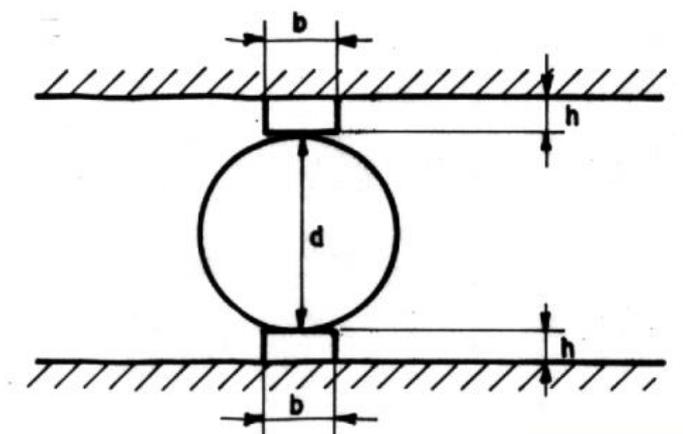
Figura 37 – (a) Preparação do cp para o ensaio de compressão diametral; (b) Execução do ensaio.



O valor da tração por compressão diametral ($f_{t,D}$) é obtido a partir da Equação 2, onde b é a espessura da tira de madeira (cm), d é o diâmetro do corpo de prova (cm), L é o comprimento do cp (cm) e F é a força de ruptura na compressão diametral (MPa), como mostra a Figura 38. A média final foi obtida a partir do rompimento de 4 CPs, para cada traço.

$$f_{t,D} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times L} \quad (\text{Equação 2})$$

Figura 38 – Esquema do ensaio de tração por compressão diametral. Fonte: NBR 7222:2011.



3.10 Análise estatística para o ensaio de resistência à compressão simples

Com o objetivo de melhorar a interpretação dos dados de amostras, com tamanho n , foram feitos os seguintes testes e análises estatísticas: teste de *outliers* ($n > 4$), estatística básica ($n > 2$) e a verificação se duas amostras são estatisticamente iguais ou não ($n > 4$).

Teste de outliers

Admitindo-se a hipótese, consensualmente aceita, de que dados de resistência à compressão do concreto seguem uma distribuição normal, e, com $n < 30$, aplicam-se na distribuição similar t de *Student*, os valores discrepantes, comumente chamados de *outliers* (VIERA FILHO, 2007). Os valores foram determinados através do software MINITAB 17®.

Estatística básica

Em seguida, foram feitas os cálculos de parâmetros estatísticos dos dados, como média, variância, desvio-padrão, coeficiente de variação e os intervalos de confiança a 95%.

Em alguns casos, foi feita também uma análise de dispersão, com o intuito de avaliar a correlação entre variáveis, através do coeficiente de correlação de Pearson (ρ) e também verificar a dispersão dos dados pelo gráfico de dispersão e pelo coeficiente de determinação (R^2).

Verificação da semelhança estatística de amostras

Duas amostras, apesar de terem médias com valores diferentes, podem não ser estatisticamente diferentes, caso a hipótese de que a diferença entre as médias seja meramente devida ao acaso seja aceita. Para isso, foi necessária a realização de dois testes: uma análise

de variância (ANOVA), que através do valor F calculado, verificou-se as hipóteses de que duas amostras possuem evidências estatísticas que suas variâncias são ou não diferentes.

Em seguida, foi realizado o teste t , para médias, a fim de verificar se duas médias podem ser consideradas estatisticamente iguais ou não. Ao fim, se as amostras possuem evidências que suas médias e variâncias não possuem diferenças estatísticas, concluiu-se que a diferença de valores entre elas foi somente devido ao acaso.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Agregados

4.1.1 Composição granulométrica

O ensaio de granulometria foi executado para determinar a dimensão dos agregados utilizados, e assim obter dados de uma importante propriedade dos mesmos. Nas Tabelas 15 e 16 observa-se a distribuição granulométrica com os percentuais retidos parciais em cada peneira, dos agregados naturais (areia fina natural (AFN), brita natural de DMC = 12,5 mm (BN 12) e brita natural de DMC = 19,0 mm (BN 19)) e agregados reciclados (areia fina reciclada (AFR), agregado reciclado de DMC = 4,8 mm (AR 4,8) e agregado reciclado de DMC = 6,3 mm (AR 6,3)).

Tabela 15 – Granulometria dos agregados naturais

Componente	Agregados naturais		
	AFN	BN 12	BN 19
Dimensão máxima característica (mm)	2,40	12,5	19,0
Módulo de finura	1,99	6,24	8,27
19,0 mm	-	-	-
12,5 mm	-	-	41,09
9,5 mm	-	9,12	89,73
6,3 mm	-	53,17	98,65
4,8 mm	0,30	73,71	99,03
2,4 mm	4,62	93,70	99,33
1,2 mm	19,09	97,59	99,85
600 µm	38,71	98,46	99,88
300 µm	56,55	98,80	99,90
150 µm	79,65	99,09	99,90

Comparando os dados das Tabelas 15 e 16, observa-se que o agregado fino natural e o reciclado apresentam módulos de finura semelhantes. O AFN possui um módulo de 1,99, e o AFR 1,84. Logo, o agregado fino reciclado (AFR) tem uma granulometria um pouco mais fina que o agregado fino natural (AFN). É importante ressaltar que, apesar de apresentarem módulos de finura semelhantes, conforme Soares *et al.* (2014), a forma dos grãos dos agregados naturais é diferente dos agregados reciclados. Enquanto os naturais costumam apresentar uma forma cúbica, os agregados reciclados tendem a apresentar uma forma mais

lamelar e achatada, o que interfere no encaixe das partículas, e, conseqüentemente, nas propriedades dos agregados e dos concretos produzidos com eles.

Após a realização do ensaio de granulometria, é necessária também a elaboração da curva granulométrica, que irá visualizar melhor o comportamento do agregado quanto à sua distribuição granulométrica (Figuras 39 e 40).

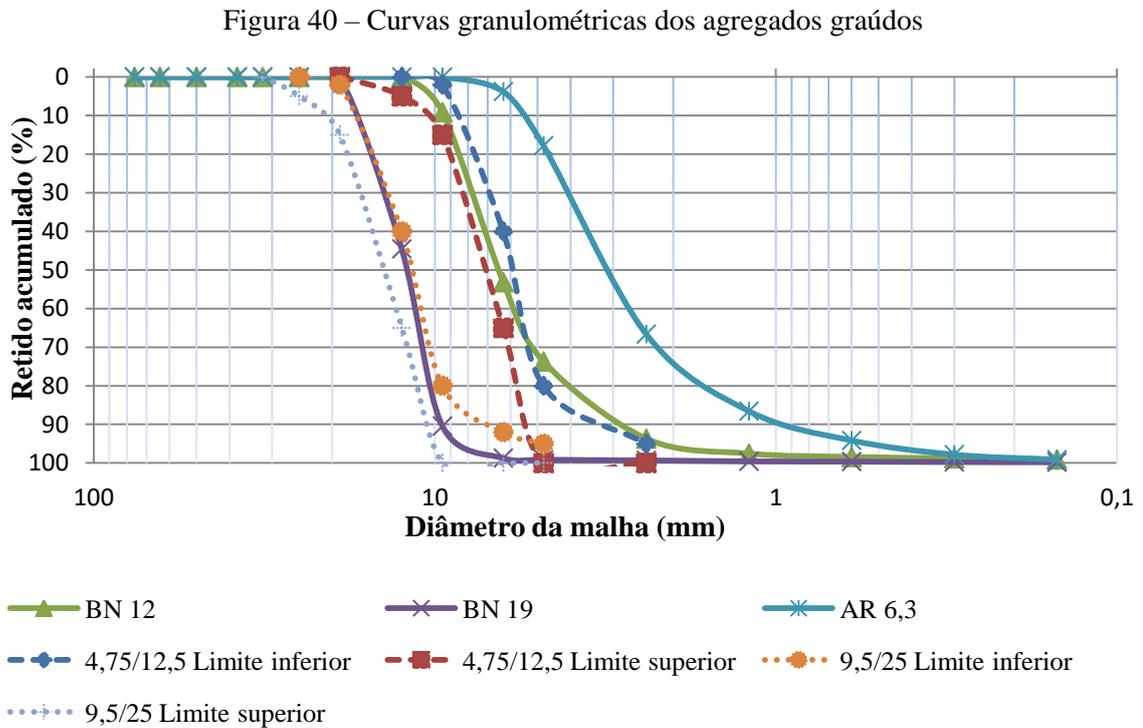
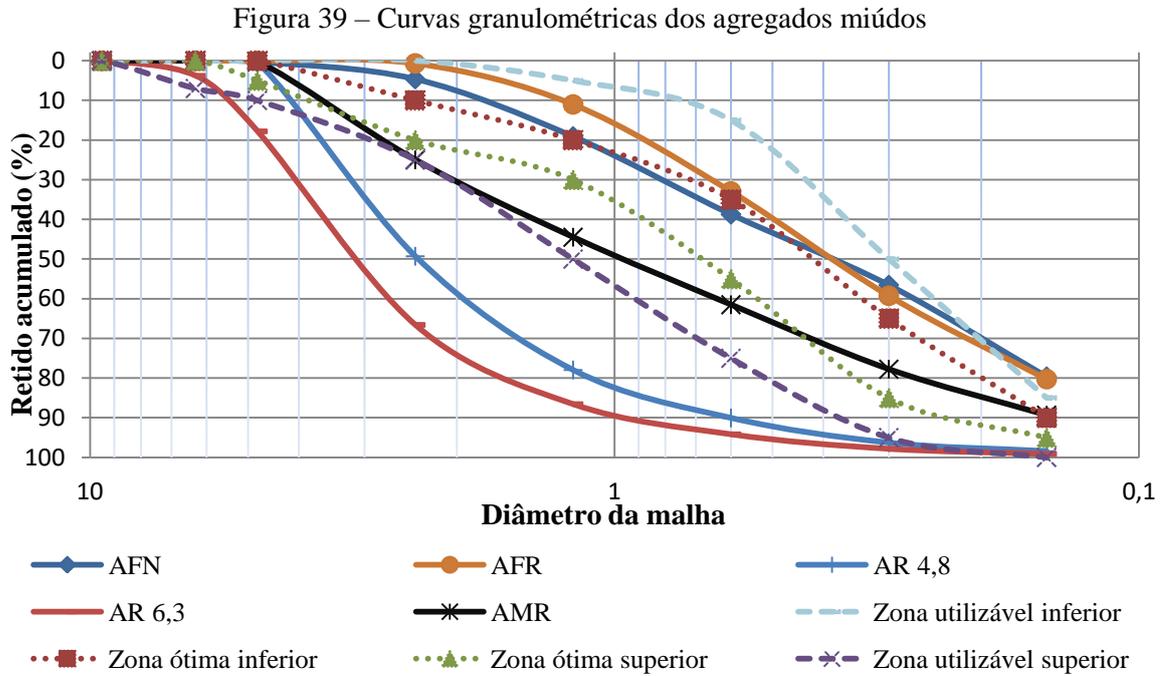
Baseando-se na Figura 39, que apresenta a curva granulométrica dos agregados miúdos, observa-se que os agregados finos (AFN e AFR) se estabeleceram, em sua grande parte, entre a Zona Utilizável Inferior e a Zona Ótima Inferior, conforme as normas NBR NM 248:2003 e NBR 7211:2006. O agregado reciclado AR 4,8 não se encaixou dentro dos limites estabelecidos pela norma, então se percebeu que não seria aconselhável utilizá-lo sozinho como agregado miúdo. A composição final do agregado miúdo reciclado (AMR) foi feita então utilizando uma mistura com 50% do AFR e 50% do AR 4,8. Após realizada tal mistura, a curva granulométrica do agregado miúdo reciclado se encaixou dentro dos limites da norma.

Tabela 16 – Granulometria dos agregados reciclados

Componente	Agregados reciclados		
	AFR	AR 4,8	AR 6,3
Dimensão máxima característica (mm)	2,40	4,80	6,30
Módulo de finura	1,84	4,12	4,66
	19,0 mm	-	-
	12,5 mm	-	-
	9,5 mm	-	-
Porcentagem retida acumulada (%)	6,3 mm	-	3,79
	4,8 mm	-	17,80
	2,4 mm	0,68	49,29
	1,2 mm	11,01	77,97
	600 µm	32,95	90,06
	300 µm	59,24	96,29
	150 µm	80,28	98,44

O agregado reciclado AR 6,3 não se enquadró em nenhuma das nomenclaturas utilizadas para os agregados (miúdo ou graúdo). Sua curva foi inserida nas Figuras 39 e 40, a fim de obter uma comparação com as outras curvas.

A Figura 40 apresenta a curva granulométrica dos agregados graúdos. Observa-se, nesta figura, que a BN 12 possui uma parte da curva fora de um dos limites estabelecidos pela norma. A BN 19 ficou dentro dos limites, sem ter nenhuma parte da curva que estabelecesse fora dos limites. O AR 6,3 não se encaixou em nenhuma das faixas granulométricas da norma.



4.1.2 Teor de material pulverulento

Com base nos resultados do teor de material pulverulento, representados na Tabela 17, com relação aos agregados naturais, o AFN obteve um teor de material pulverulento em 4,05%, e os agregados graúdos BN 12 e BN 19, 0,72% e 0,46% respectivamente. É de se esperar que, quanto maior a quantidade de material pulverulento, mais água será preciso para compensar a perda de trabalhabilidade.

Com relação aos agregados reciclados, os mesmos obtiveram valores altos, que não seriam aconselháveis de serem utilizados segundo o requisito da norma. Entretanto, este tipo de comportamento é comum entre os agregados reciclados miúdos, inclusive o agregado reciclado cinza. Pesquisas mostram que este valor pode chegar a 14% (SOUZA, 2001) para o agregado reciclado misto e 7,9% (BARBOSA JR., 2008), para o agregado reciclado cinza.

Tais resultados indicam que os agregados naturais ficaram dentro do limite máximo estabelecido pela norma NBR 7211:2005, que é específica para agregados naturais, estipula o valor máximo de 1% para agregados graúdos e 5% para agregados miúdos. A NBR 15116:2004, que recomenda o uso de agregados reciclados para concretos sem função estrutural, estabelece um valor máximo de 15% para agregados miúdos e 10% para agregados graúdos. Caso o agregado fosse utilizado em concretos não estruturais, estaria dentro dos parâmetros da norma.

Tabela 17 – Teor de material pulverulento

Componente	Agregados naturais			Agregados reciclados		
	AFN	BN 12	BN 19	AFR	AR 4,8	AR 6,3
Teor de material pulverulento (%)	4,05	0,72	0,46	8,50	5,83	5,91

4.1.3 Massa específica e massa unitária

Os resultados expostos na Tabela 18 mostram que os agregados reciclados possuem valores de massa específica e massa unitária inferiores aos agregados naturais, característica que é comum na literatura.

O agregado fino reciclado (AFR) possui um valor de massa específica 7% menor que o agregado fino natural (AFN). Tal decréscimo é comum em pesquisas levantadas e o resultado de 2,36 g/cm³ está dentro da faixa normalmente encontrada na literatura (2,33 – 2,54 g/cm³).

Os agregados reciclados AR 4,8 e AR 6,3 também apresentaram resultados dentro da normalidade.

Os agregados graúdos, as britas BN 12 e BN 19, também apresentaram resultados de massa específica dentro da normalidade.

Tabela 18 – Massa Específica e massa unitária

Componente	Agregados naturais			Agregados reciclados		
	AFN	BN 12	BN 19	AFR	AR 4,8	AR 6,3
Massa específica (g/cm ³)	2,54	2,61	2,62	2,36	2,39	2,44
Massa unitária (g/cm ³)	1,60	1,37	1,42	1,28	1,35	1,37

4.1.4 Absorção de água

Devido à porosidade dos agregados reciclados, é comum que estes apresentem menor massa específica e maior absorção de água.

Conforme a Tabela 19, os agregados naturais apresentaram baixas taxas de absorção, com o AFN tendo uma absorção de 0,53%, a BN 12 1,12% e a BN 19 0,72%. Os agregados reciclados, entretanto, apresentaram taxas significativamente superiores, com o agregado fino reciclado tendo uma absorção de 12,65%.

Tais valores foram semelhantes à pesquisa de Brito; Evangelista (2007) que estudaram o uso de RCC cinza em concreto, e obtiveram um valor de 13,10% para a absorção do agregado fino reciclado, enquanto o agregado natural obteve apenas 0,80%.

Baseando-se nas recomendações para concreto não estrutural, o valor da absorção do AFR está um pouco acima da NBR 15116:2004, que estabelece um valor máximo de 12% para o agregado miúdo reciclado de concreto. A consequência disso é o aumento da absorção por parte dos concretos reciclados, à medida que o percentual de agregado reciclado na massa do concreto é aumentado.

Tabela 19 – Absorção de água

Componente	Agregados naturais			Agregados reciclados		
	AFN	BN 12	BN 19	AFR	AR 4,8	AR 6,3
Absorção de água (%)	0,53	1,12	0,72	12,65	7,58	7,55

4.1.5 Abrasão Los Angeles

A Tabela 20 mostra os resultados de abrasão Los Angeles para os agregados graúdos naturais (BN 12 e BN 19). Visando o uso em concreto estrutural, ambos os agregados naturais obtiveram valores menores que o limite máximo estabelecido pela NBR 7211:2006, que é de 50%.

Tabela 20 – Abrasão Los Angeles

Componente	Agregados naturais	
	BN 12	BN 19
Abrasão Los Angeles (%)	20,89	26,48

4.2 Ensaio do concreto

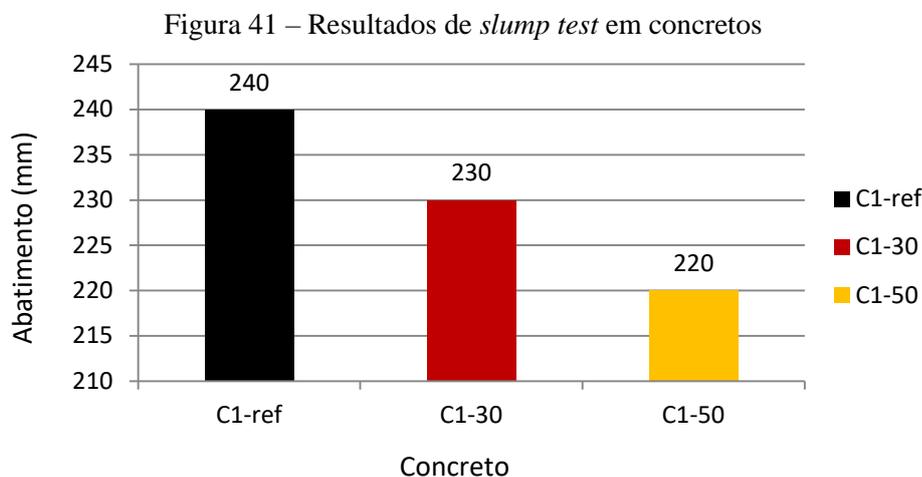
4.2.1 Concreto fresco

4.2.1.1 Abatimento de tronco de cone

Após o término da concretagem de cada traço, foi realizado o ensaio de abatimento com o concreto fresco. É importante ressaltar que o ensaio de abatimento é um dos indicadores de trabalhabilidade do concreto, entretanto não pode ser utilizado como o único, pois a viscosidade aparente do concreto não é demonstrada neste ensaio. Essa noção de viscosidade pelo aspecto visual é perceptível àqueles que têm experiência em produção de concretos.

Os valores de abatimento de tronco de cone estão demonstrados na Figura 40. Para concretos do grupo C1, o abatimento de referência foi estabelecido entre 230 ± 20 mm, sendo então concretos semifluidos. No grupo C2, pelo fato dos concretos terem uma consistência seca, não foram avaliados quanto ao *slump test*, pois em teoria, o resultado deveria ser zero.

Os resultados mostram que os concretos ficaram dentro da faixa predeterminada (Figura 41). A relação a/c variou justamente para que os concretos possuísem resultados de abatimento próximos entre si.



4.2.1.2 Massa Unitária

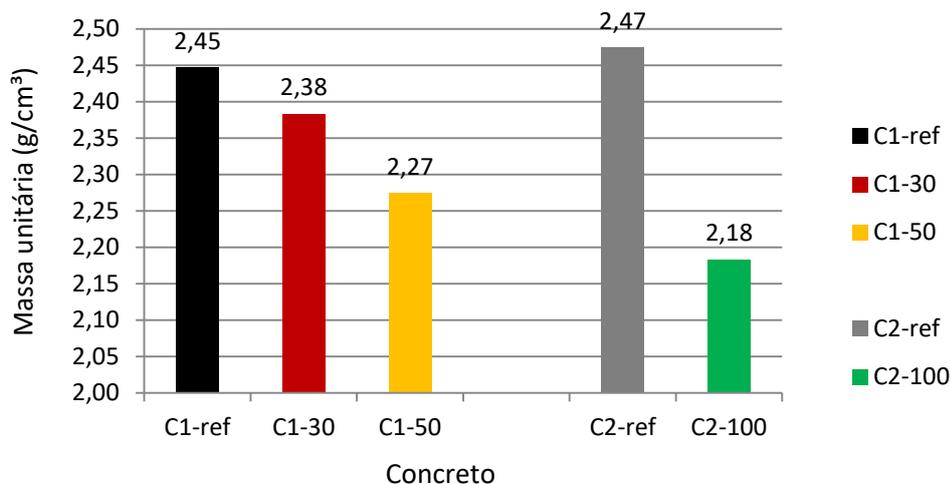
A massa unitária visa avaliar a densidade aparente do concreto no seu estado fresco. A Figura 42 mostra resultados de massa unitária para os traços dos concretos confeccionados.

Para os concretos do grupo C1, observou-se que a massa unitária do concreto foi diminuindo à medida que se aumentou a quantidade de agregados reciclados em sua composição. O concreto C1-ref, com 0% de agregados reciclados, obteve uma massa unitária de 2,45 g/cm³, enquanto o C1-30, com 30% de agregados reciclados miúdos, mostrou um valor de 2,38 g/cm³, e o C1-50, com 50%, obteve uma massa unitária de 2,27 g/cm³. Em termos percentuais, com o aumento de 30% da quantidade de agregados reciclados miúdos, houve um decréscimo de 2,86% na massa unitária; e com 50% de AFR, houve um decréscimo de 7,34% na massa unitária, em relação ao concreto sem AFR.

Para os concretos do grupo C2, a mesma lógica foi obedecida. A massa unitária calculada do concreto C2-ref, com 0% de agregados reciclados foi de 2,47 g/cm³, enquanto a do concreto C2-100, com 100%, foi 2,18 g/cm³. Houve então um decréscimo de 11,74%, uma vez que se aumentou a quantidade de agregados reciclados para 100%.

Em sua pesquisa, Soares *et. al* (2014) observou um decréscimo de 4,2% na massa unitária do concreto com 100% de agregados graúdos reciclados.

Figura 42 – Massa unitária



4.2.2 Concreto endurecido

4.2.2.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nos concretos nas idades de 1, 7, 28 e 105 dias. Inicialmente, foi realizada uma análise dos valores discrepantes (*outliers*) a 1% de significância, segundo orientação da Norma estadunidense ASTM E 178-02. A hipótese de que existe algum valor discrepante é aceita se G calculado $>$ G crítico. Não foi verificado nenhum *outlier* em nenhuma das amostras, conforme mostra a Tabela 21.

Foram rompidos 18 corpos de prova para os concretos do grupo C1 e 8 para os concretos do grupo C2. A Tabela 22 ilustra os valores médios de resistência à compressão simples, e os respectivos desvios-padrões e coeficientes de variação das amostras de cada idade. No Apêndice C estão expostos, de forma mais detalhada, os dados de resistência à compressão simples dos corpos de prova, assim como seus intervalos de confiança a 95%, média, valores mínimos e máximos, desvio padrão e coeficiente de variação. Houve um aumento das resistências dos concretos ao longo do tempo, demonstrando uma coerência nos resultados obtidos.

Observou-se, nos concretos do tipo C1 (C1-ref, C1-30 e C1-50), que a média dos valores de resistência à compressão simples foram próximas entre si. Neste grupo, nos dias de cura 1°, 7° e 105°, a diferença entre os valores não superou 3,0 MPa. Aos 28 dias, a diferença foi inferior a 5,0 MPa. Os desvios-padrões se estabeleceram entre 3,50 MPa e 6,50 MPa,

aproximadamente. Com relação aos coeficientes de variação, não houve uma tendência de aumento ou diminuição com o aumento do percentual de agregados reciclados.

Tabela 21 – Verificação de *outliers*

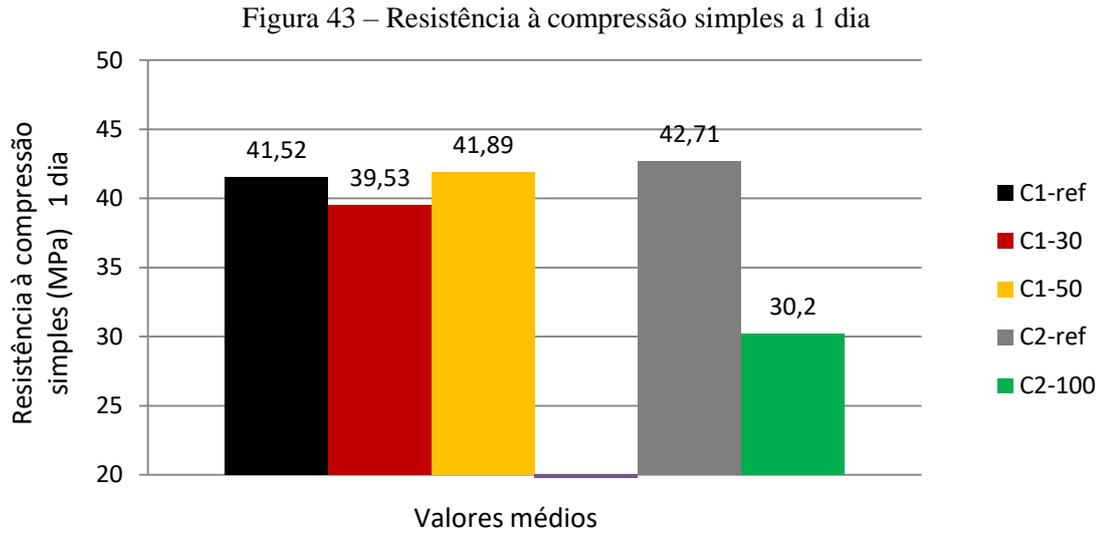
Concreto	Idade de cura (dias)	Número de corpos de prova	Teste de outliers segundo recomendação da ASTM E 178-02		
			G crítico	G calculado	Conclusão
C1-ref	1	18	2,82	2,65	Nenhum valor eliminado
	7	18	2,82	1,65	Nenhum valor eliminado
	28	18	2,82	1,79	Nenhum valor eliminado
	105	18	2,82	1,92	Nenhum valor eliminado
C1-30	1	18	2,82	1,92	Nenhum valor eliminado
	7	18	2,82	2,17	Nenhum valor eliminado
	28	18	2,82	2,12	Nenhum valor eliminado
	105	18	2,82	2,22	Nenhum valor eliminado
C1-50	1	18	2,82	1,70	Nenhum valor eliminado
	7	18	2,82	1,94	Nenhum valor eliminado
	28	18	2,82	2,01	Nenhum valor eliminado
	105	18	2,82	2,00	Nenhum valor eliminado
C2-ref	1	8	2,22	2,07	Nenhum valor eliminado
	7	8	2,22	1,45	Nenhum valor eliminado
	28	8	2,22	1,46	Nenhum valor eliminado
	105	8	2,22	1,34	Nenhum valor eliminado
C2-100	1	8	2,22	1,75	Nenhum valor eliminado
	7	8	2,22	1,51	Nenhum valor eliminado
	28	8	2,22	1,74	Nenhum valor eliminado
	105	8	2,22	1,70	Nenhum valor eliminado

Com relação aos traços do grupo C2, em todas as idades, o concreto C2-ref obteve resistências superiores ao C2-100. Os desvios-padrões entre 1,84 MPa e 3,61 MPa, com excessão do concreto C2-ref aos 7 dias, que obteve um desvio padrão de 7,16 MPa. No geral, os desvios foram menores que os concretos do grupo C1. Também não houve uma relação entre o coeficiente de variação e a quantidade de agregados reciclados.

Tabela 22 – Valores de Resistência à compressão média e máxima

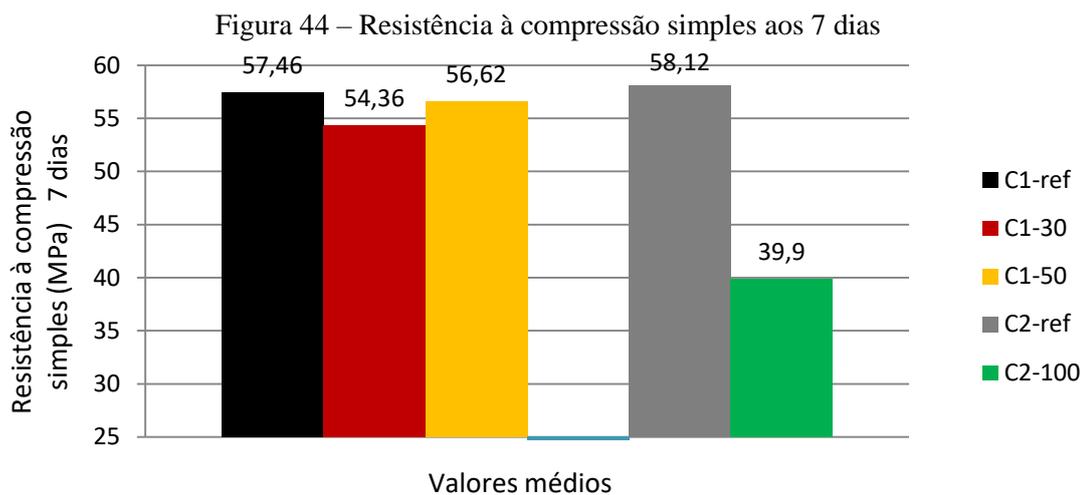
Tempo de cura (dias)	Concreto	Número de corpos de prova	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
1	C1-ref	18	41,52	3,47	8,36
	C1-30	18	39,53	4,26	10,77
	C1-50	18	41,89	3,81	9,08
	C2-ref	8	42,71	2,55	5,97
	C2-100	8	30,20	3,50	11,61
7	C1-ref	18	57,46	6,49	11,29
	C1-30	18	54,36	3,97	7,31
	C1-50	18	56,62	5,02	8,87
	C2-ref	8	58,12	7,16	12,33
	C2-100	8	39,90	3,01	7,53
28	C1-ref	18	61,89	3,82	6,18
	C1-30	18	57,30	5,26	9,17
	C1-50	18	60,32	5,03	8,33
	C2-ref	8	66,46	3,61	5,43
	C2-100	8	47,68	1,84	3,86
105	C1-ref	18	84,69	3,42	4,04
	C1-30	18	87,13	3,51	4,02
	C1-50	18	84,81	3,61	4,27
	C2-ref	8	73,58	2,79	3,79
	C2-100	8	53,86	2,54	4,72

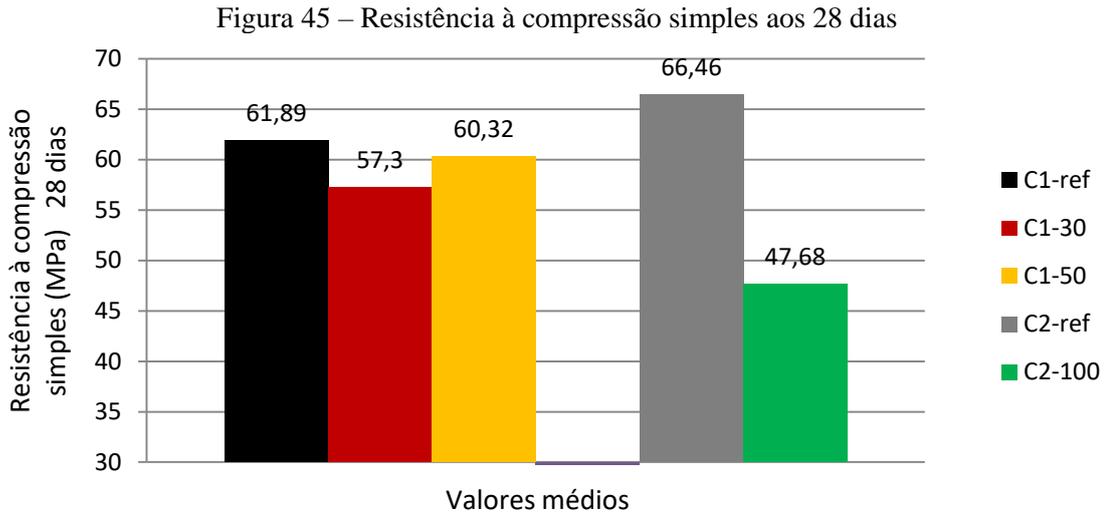
Analisando individualmente as resistências por idade, ao primeiro dia (Figura 43), nota-se que, no grupo C1, houve uma aproximação entre os valores de resistência à compressão simples. O concreto C1-ref obteve 41,52 MPa de resistência, enquanto o C1-30 obteve 39,53 MPa (- 4,79 %) e o C1-50 41,89 MPa (+ 0,89%). No grupo C2, o concreto C2-ref apresentou um valor de resistência 12,51 MPa maior em relação ao C2-100. Em termos percentuais, a resistência do C2-ref foi 41,42% maior em comparação com C2-100.



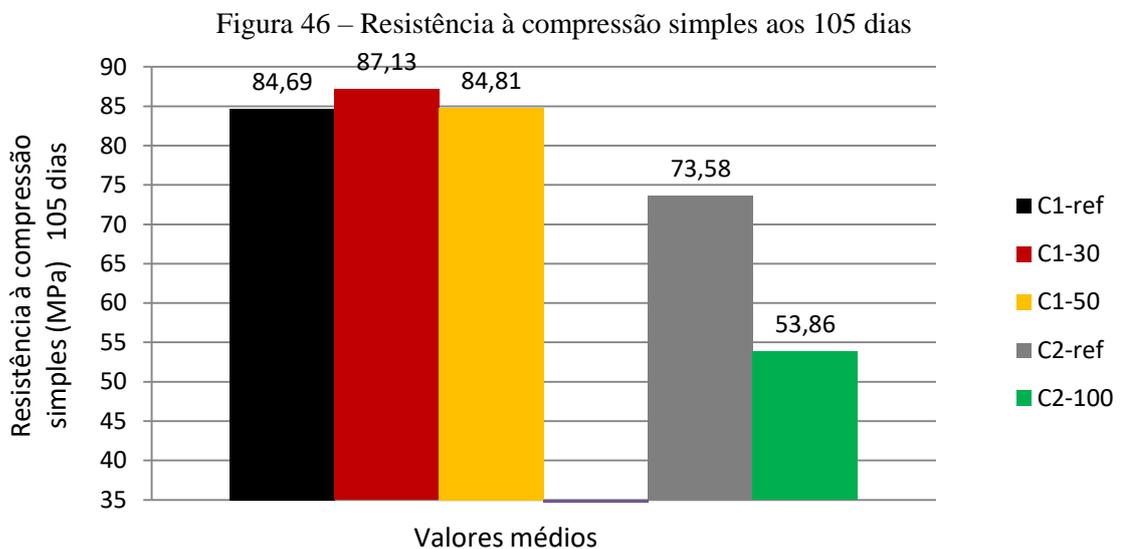
Aos 7 dias (Figura 44), o concreto C1-ref apresentou um melhor desempenho em sua resistência média, com relação aos concretos C1-30 e C1-50. Observa-se também que o concreto C1-50, com 50% de agregados finos reciclados (AFR), apresentou um melhor desempenho que o C1-30, com 30% de AFR.

Como no primeiro dia, o concreto C2-0 continuou a apresentar resultados significativamente superiores ao C2-100. Nesta idade, aos 7 dias, o concreto C2-ref, sem agregado reciclado, apresentou uma resistência média 46% superior em relação ao C2-100, chegando a 18,22 MPa em termos absolutos.





Aos 28 dias (Figura 45), os resultados obtiveram uma proporção semelhante aos valores de resistência aos 7 dias. Os concretos C1-ref e C1-50 apresentaram uma diferença de 1,57 MPa e foram superiores em relação ao C1-30. No grupo C2, a disparidade entre os concretos continuou constante, chegando a 18,78 MPa em termos absolutos, e 39,39% em termos percentuais.

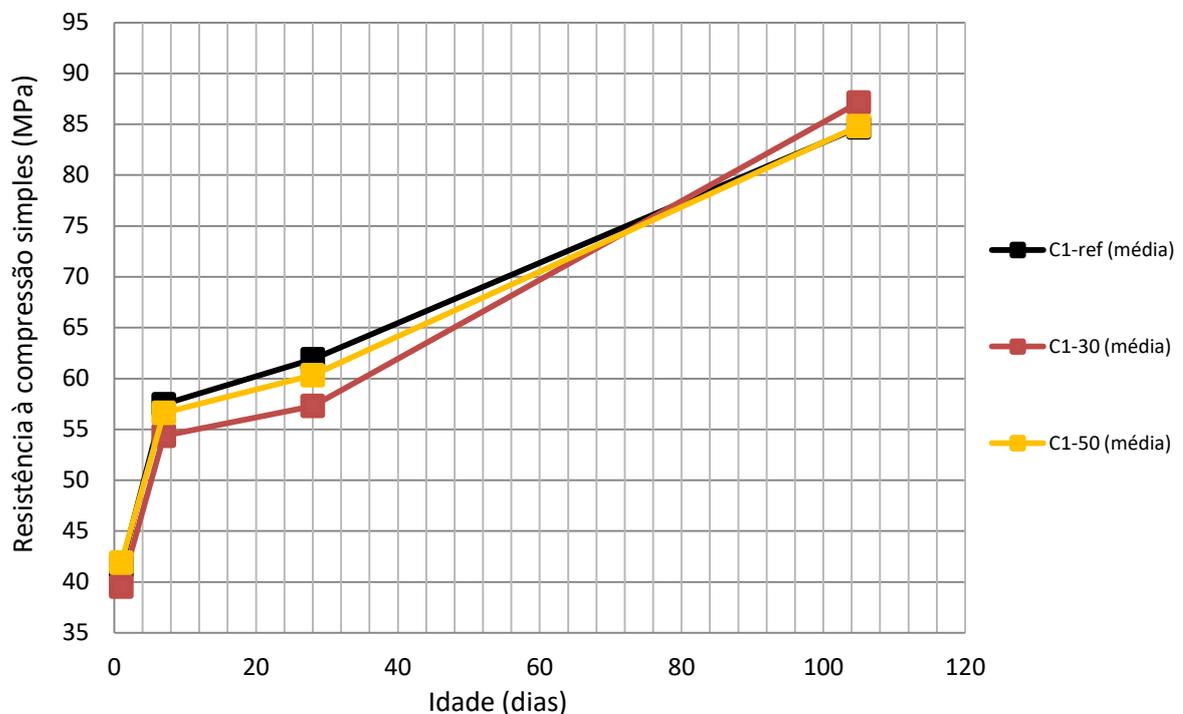


Aos 105 dias (Figura 46), no grupo C1, houve uma inversão da tendência das outras idades. O concreto C1-30 obteve uma resistência superior aos demais, e os concretos C1-ref e C1-50 continuaram a ter uma pequena diferença entre eles, que nesta idade foi de 0,12 MPa. No grupo C2, a diferença foi de 19,72 MPa e o concreto C2-ref foi 36,61% superior em relação ao C2-100.

Quando se analisa os resultados das resistências ao longo do tempo (Figura 47), verifica-se que existe um comportamento semelhante entre os traços C1-ref e C1-50, tanto com relação às resistências médias como as máximas. Ambos obtiveram um desempenho levemente superior ao concreto C1-30. Aos 28 dias, por exemplo, os traços C1-ref e C1-50 obtiveram resistências médias superiores aos 60 MPa, enquanto o traço C1-30 não ultrapassou 58 MPa.

Tal comportamento aconteceu parcialmente na pesquisa de Evangelista; Brito (2007). Nela, os concretos com 30% e 50% de agregado fino reciclado apresentaram resistências à compressão 1,9 MPa e 1,4 MPa maiores, respectivamente, em relação ao concreto sem agregado reciclado.

Figura 47 – Valores médios de resistência à compressão simples vs. Idade – Grupo C1.



Analisando os intervalos de confiança a 95% de significância, com os respectivos limites inferiores e superiores e valores máximos de cada concreto e idade (Figura 48), em conjunto com os dados da Figura 47, percebe-se um entrelaçamento das linhas e uma falta de tendência entre o percentual de agregados reciclados e os valores. Tal proximidade dos valores, adicionado a esta falta de tendência, caracteriza-se uma possível semelhança estatística entre as amostras. Por isso, a fim de averiguar esta possibilidade, foram realizados testes estatísticos de variância e média.

Com relação aos traços C2-ref e C2-100 (Figura 49), observou-se que o concreto do C2-ref obteve resultados superiores em relação ao C2-100, em todas as idades, onde o desempenho variou entre 35% até 50% superior. Além disso, as linhas ficaram praticamente paralelas caracterizando uma significativa diferença entre os concretos.

Algumas pesquisas (EVANGELISTA; BRITO, 2007; SOARES *et al.*, 2014) apontam um decréscimo de desempenho na resistência à compressão de concretos moldados com 100% de agregado reciclado de concreto. Neste caso, a queda de desempenho deve-se, principalmente, ao considerável aumento da relação a/c, que acabou influenciando diretamente na resistência à compressão.

Figura 48 – Intervalos de confiança de resistência à compressão simples vs. Idade – Grupo C1

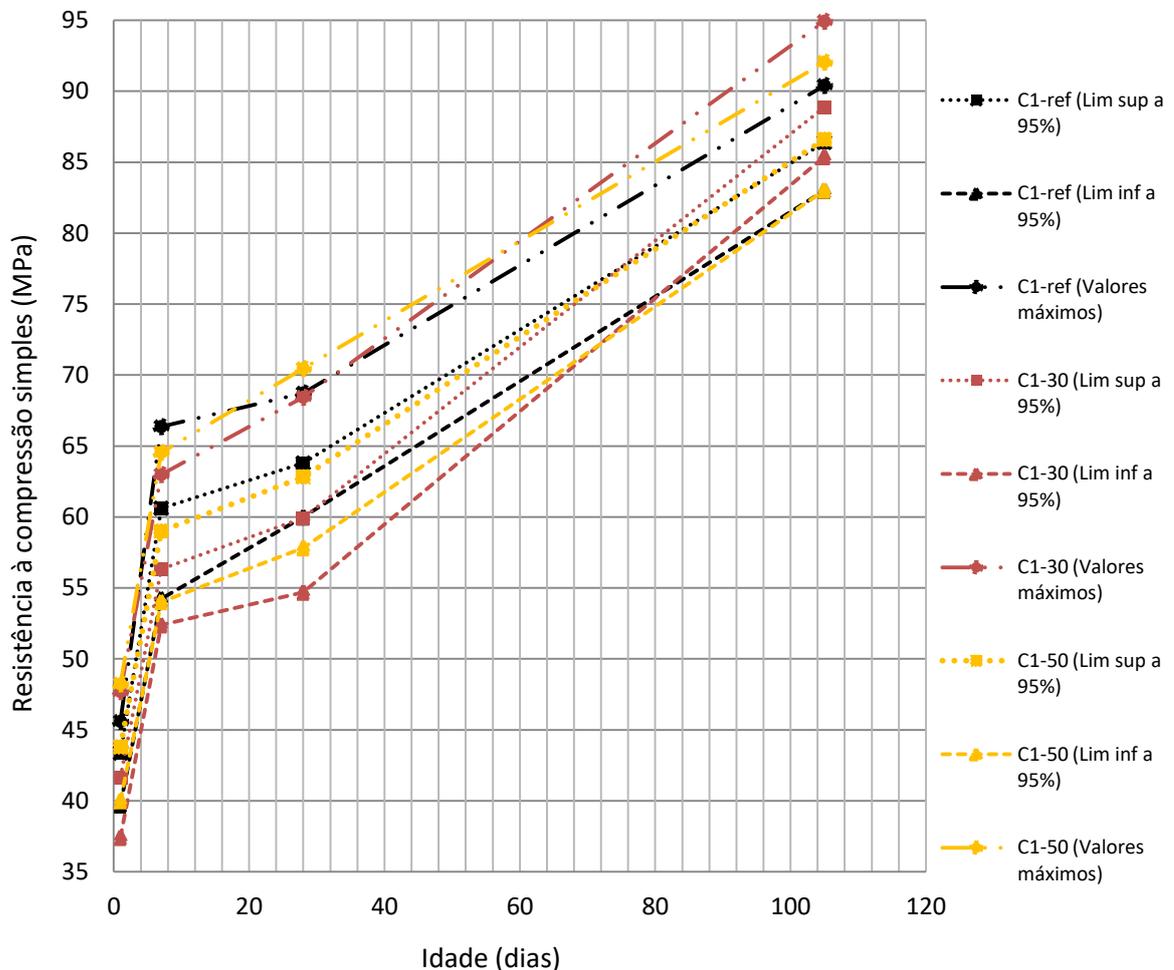
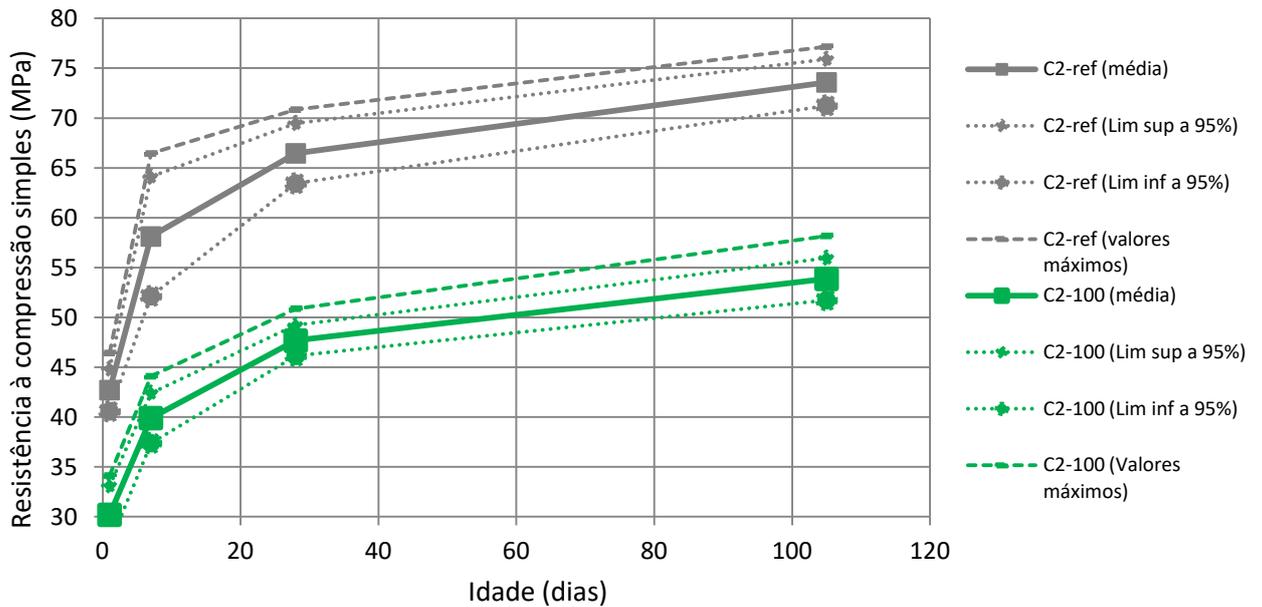


Figura 49 – Resistência à compressão simples VS. idade – Grupo C2



Análise de semelhança estatística de variâncias e médias

A Tabela 23 expõe os resultados da ANOVA realizada com os dados de resistência à compressão simples (os dados detalhados com o Teste T se encontram na Tabela F.1, localizada no Apêndice F). Em comparações entre amostras de 18 dados, que foi o caso dos concretos do grupo C1, o $F_{\text{crítico}}$ foi igual a 4,13. Para amostras de 8 dados, que ocorreu no grupo C2, o $F_{\text{crítico}}$ foi 4,60. Nas comparações que apresentarem um $F_{\text{calculado}}$ menor que o $F_{\text{crítico}}$, pode-se afirmar que as amostras possuem diferenças estatísticas significantes.

Observa-se que, nos concretos do grupo C1, houve semelhanças de média e variância na maioria das comparações. No primeiro e no sétimo dia de idade dos corpos de prova, todos os traços do grupo C1 (C1-ref, C1-30, C1-50) apresentaram semelhança estatística, conforme os testes de análise de variância (ANOVA) e teste T para médias. Houve apenas diferenças estatísticas significantes em dois casos: entre os traços C1-0 e C1-30 aos 28 dias e C1-0 e C1-30 aos 105 dias. No primeiro caso, o $F_{\text{calculado}}$ foi de 4,46, enquanto no segundo caso, o $F_{\text{calculado}}$ foi 8,96. Isso significa que a comparação que apresentou um valor maior do $F_{\text{calculado}}$ apresenta mais evidências de diferenças estatísticas que a outra comparação.

No grupo C2, os valores de $F_{\text{calculado}}$ foram muito superiores aos do $F_{\text{crítico}}$, deixando de forma mais evidente a diferença dos valores de resistência à compressão entre esses dois traços.

Tabela 23 – Resumo da análise de semelhança estatística dos resultados de resistência à compressão simples

Idade (dias)	Referência	F crítico	F calculado	Conclusão
1	C1-ref x C1-30	4,13	2,37	Amostras iguais
	C1-ref x C1-50	4,13	0,09	Amostras iguais
	C1-30 x C1-50	4,13	3,08	Amostras iguais
7	C1-ref x C1-30	4,13	2,97	Amostras iguais
	C1-ref x C1-50	4,13	0,23	Amostras iguais
	C1-30 x C1-50	4,13	2,03	Amostras iguais
28	C1-ref x C1-30	4,13	8,96	Amostras diferentes
	C1-ref x C1-50	4,13	1,10	Amostras iguais
	C1-30 x C1-50	4,13	3,10	Amostras iguais
105	C1-ref x C1-30	4,13	4,46	Amostras diferentes
	C1-ref x C1-50	4,13	0,01	Amostras iguais
	C1-30 x C1-50	4,13	3,81	Amostras iguais
1	C2-ref x C2-100	4,60	66,62	Amostras diferentes
7	C2-ref x C2-100	4,60	43,97	Amostras diferentes
28	C2-ref x C2-100	4,60	171,90	Amostras diferentes
105	C2-ref x C2-100	4,60	218,73	Amostras diferentes

4.2.2.2 Esclerometria

Os cálculos dos índices esclerométricos médios (IEM) foram realizados de acordo com a NBR 7854. Os resultados detalhados, por corpo de prova, estão expostos no Apêndice D, e as correlações com o ensaio de resistência à compressão simples estão detalhadas no Apêndice E. Na Tabela 24, os resultados apresentados são referentes à média de cada idade por traço. Os ensaios de esclerometria foram realizados antes do rompimento à compressão simples de cada corpo de prova. Observa-se que os valores seguem uma tendência dos resultados de resistência à compressão. Ou seja, quanto maior a resistência à compressão simples (RCS), maior foi o valor do IEM.

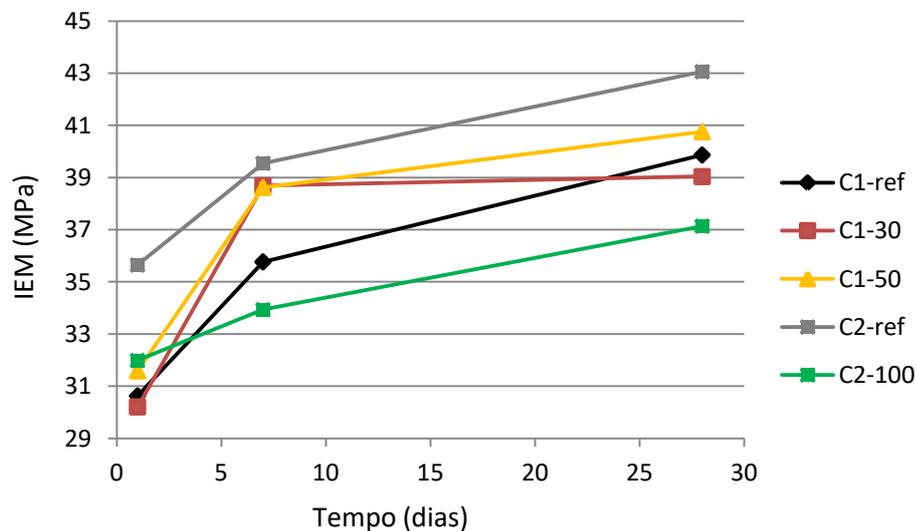
Ainda analisando a Tabela 24, nota-se que houve um decréscimo da relação IEM/RCS em todos os concretos, ao longo do tempo. Isso quer dizer que a diferença entre os valores das propriedades de resistência à compressão simples e IEM aumentou ao longo do tempo, com os valores de resistência sendo maiores que os IEM.

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de esclerometria.

Concreto	N° de CPs por idade	1 dia		7 dias		28 dias	
		IEM (MPa)	Relação IEM/RCS	IEM (MPa)	Relação IEM/RCS	IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
C1-ref	18	30,63	0,74	35,77	0,63	39,87	0,65
C1-30	18	30,21	0,77	38,69	0,71	39,04	0,68
C1-50	18	31,59	0,76	38,62	0,69	40,76	0,68
C2-ref	8	35,65	0,83	39,55	0,69	43,06	0,65
C2-100	8	31,99	1,07	33,94	0,85	37,14	0,78

Analisando os dados de ganho do valor do IEM ao longo do tempo (Figura 50), verifica-se que não houve uma padronização no comportamento dos valores. O concreto C1-50, por exemplo, obteve um aumento maior de seu IEM em relação aos concretos C1-0 e C1-30. O concreto C1-30 obteve um ganho de IEM em 28% do primeiro para o sétimo dia, mas, para o vigésimo oitavo dia, o aumento foi de apenas 0,9%. No grupo C2, o concreto C2-0, em comparação com o C2-100, obteve IEMs superiores em todas as idades, chegando a ter um valor 16% superior no vigésimo oitavo dia de cura.

Figura 50 – IEM ao longo do tempo



4.2.2.3 Absorção de água e massa específica

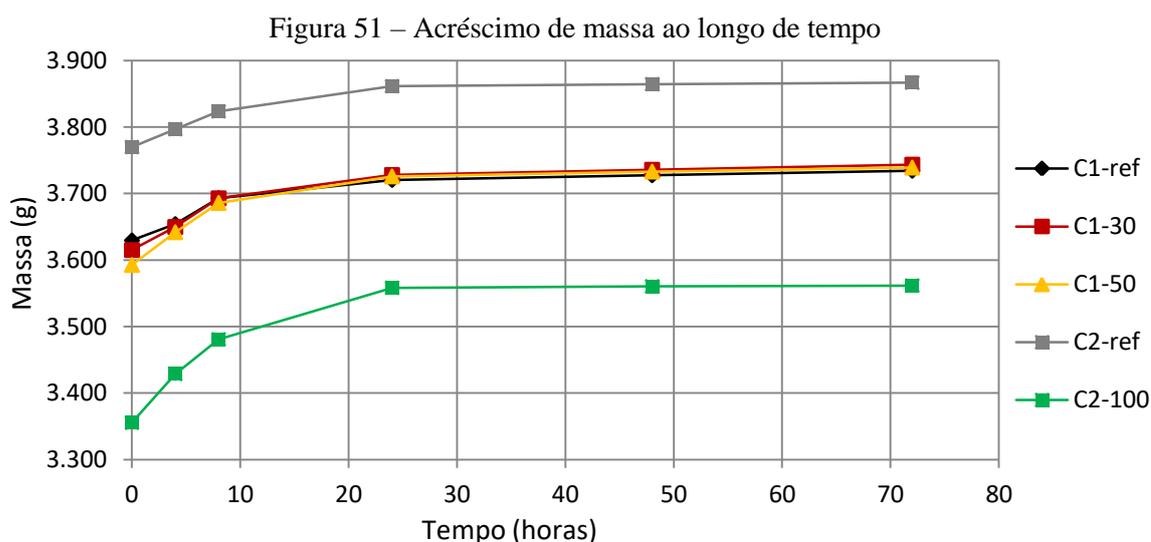
A Tabela 25 mostra os valores de absorção, massa seca, saturada (t_5) e o valor da massa submersa em água em cada um dos instantes t_0 , t_1 , t_2 , t_3 e t_4 . Os detalhamentos dos valores de massa e absorção por corpo de prova estão expostos no Apêndice G. Observa-se que os

valores obedeceram a uma tendência e foram proporcionais à quantidade de agregado reciclado em cada concreto.

Tabela 25 – Massas e absorção dos concretos

Concreto	Massa seca – t_0 (g)	Massa em t_1 (g)	Massa em t_2 (g)	Massa em t_3 (g)	Massa em t_4 (g)	Massa saturada em t_5 (g)	Massa saturada submersa (g)
C1-ref	3.629,5	3.654,1	3.693,1	3.720,4	3.727,5	3.734,2	2.206,1
C1-30	3.615,0	3.649,7	3.692,8	3.727,8	3.735,7	3.743,4	2.180,1
C1-50	3.592,5	3.641,8	3.685,9	3.725,8	3.733,0	3.739,0	2.157,8
C2-ref	3.769,8	3.796,8	3.823,5	3.861,4	3.864,5	3.866,7	2.276,9
C2-100	3.355,3	3.428,7	3.480,8	3.558,2	3.560,4	3.561,7	1.954,8

Analisando a Figura 51, verificam-se os acréscimos médios de massa dos corpos de prova ao longo do tempo, em cada Traço. O primeiro tempo, $t_0 = 0$, corresponde ao corpo de prova seco, após ser colocado 72 h em estufa. Observa-se que os corpos de prova dos concretos do grupo C1 mostraram um desempenho semelhante, e como o C1-50 obteve um menor peso seco, isso sugere que ao final, ele obteve uma maior absorção. O concreto C2-ref obteve um ganho muito menor de massa ao longo do tempo, o que sugere ter absorvido uma quantidade menor de água.

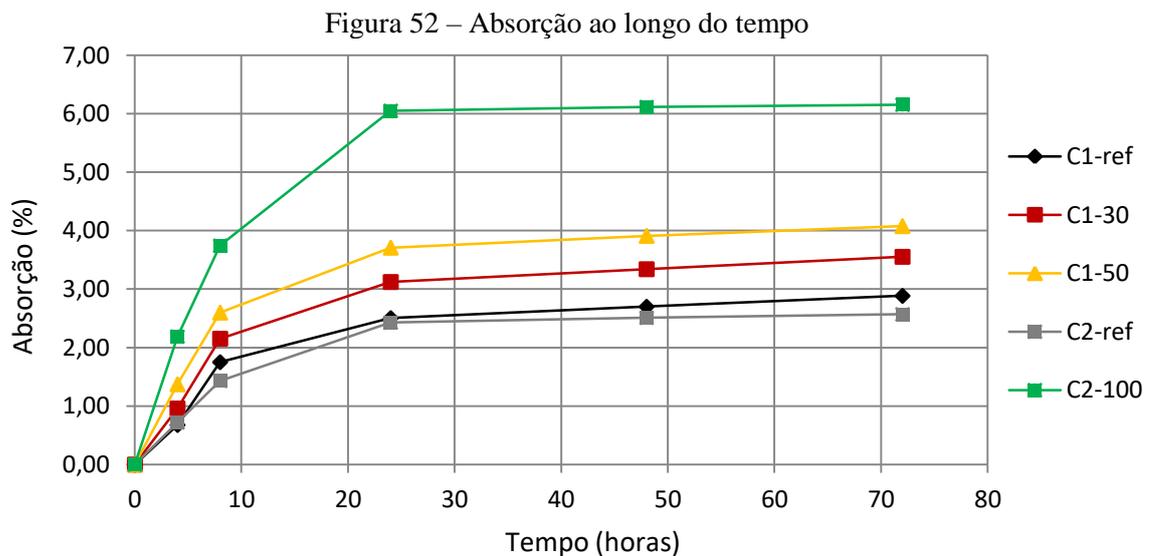


A Tabela 26 apresenta os valores médios da absorção de água ao longo do tempo. Nela, é possível verificar que o concreto C1-ref absorveu menos água que os concretos C1-30 e C1-50, e o C2-ref absorveu menos água que o Traço C2-100. O C1-50, que contém 50% de

agregado miúdo reciclado, absorveu mais água que os corpos de prova do concreto C1-30, que contém 30% desse agregado. Graficamente, a evolução da absorção com o tempo está exposta na Figura 52.

Tabela 26 – Evolução da absorção em função do tempo

Concreto	Absorção em 4 h (%)	Absorção em 8 h (%)	Absorção em 24 h (%)	Absorção em 48 h (%)	Absorção final - 72 h (%)
C1-ref	0,68	1,75	2,50	2,70	2,89
C1-30	0,96	2,15	3,12	3,34	3,55
C1-50	1,37	2,60	3,71	3,91	4,08
C2-ref	0,72	1,43	2,43	2,51	2,57
C2-100	2,19	3,74	6,05	6,12	6,15



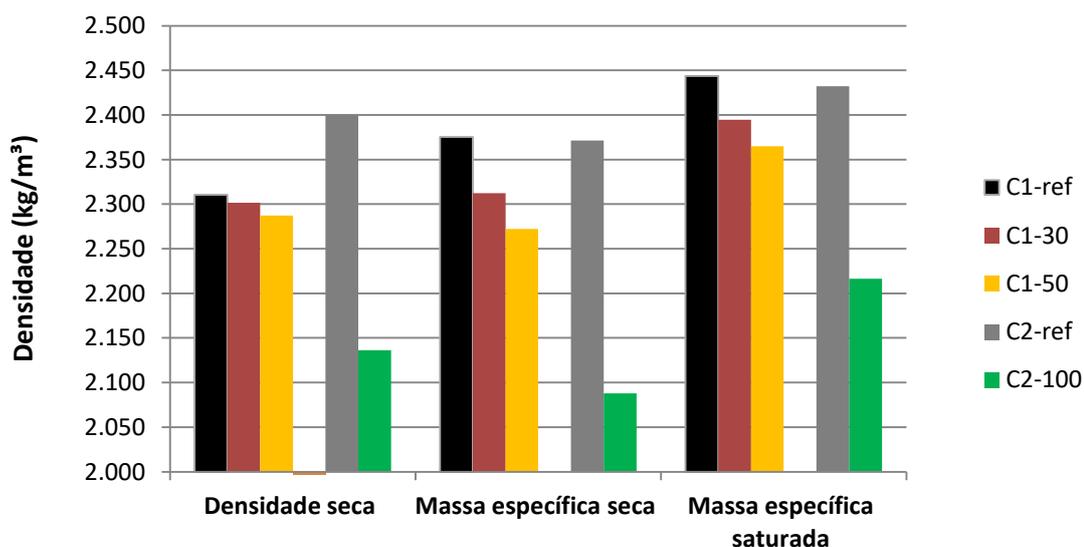
A partir dos dados da massa seca, massa saturada e massa saturada submersa em água de cada corpo de prova, foi possível calcular os dados de índice de vazios, densidade, massa específica seca, saturada e o índice de vazios de cada traço (Tabela 27). Com relação ao índice de vazios, nota-se que os valores foram aumentando à proporção da quantidade de agregados reciclados.

Tabela 27 – Índice de vazios, densidade e massa específica

Concreto	Índice de vazios	Densidade seca (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)
C1-ref	0,069	2,311	2,375	2,443
C1-30	0,082	2,301	2,312	2,394
C1-50	0,093	2,287	2,272	2,364
C2-ref	0,061	2,400	2,371	2,432
C2-100	0,128	2,136	2,088	2,216

Ao analisar os dados de densidade seca, massa específica seca e saturada, na Figura 53, verifica-se uma tendência, onde quanto maior a quantidade de agregados reciclados, menor foram estes valores. A massa específica seca, do concreto C1-0 foi 2,72% maior que a do C1-30 e 4,54% maior que o concreto C1-50. O C2-ref obteve uma massa específica seca 12,35% maior que o C2-100.

Figura 53 – Densidade e massa específica



Resultados de ensaios como Gonçalves (2011) e Soares *et al.* (2014) sugerem um aumento da absorção de água e diminuição da massa específica do concreto à medida que se aumenta a quantidade de agregados reciclados no concreto. Isso se deve à presença de argamassa aderida nas partículas dos agregados, responsáveis pelo aumento da porosidade do concreto, aumento o número de vazios e conseqüentemente aumentando a absorção e diminuindo sua massa específica.

4.2.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico (ultrassom)

A partir do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, extraem-se informações como o tempo de propagação de onda do ultrassom, a velocidade dessa propagação e o módulo de elasticidade estático. Por ser não destrutivo, ainda pode tentar verificar se há alguma correlação com os resultados de resistência à compressão simples, que são realizados posteriormente.

As médias dos resultados estão apresentadas na Tabela 28 e os resultados individuais, por corpo de prova, estão dispostos no Apêndice H.

Tabela 28 – Resultados de módulo de elasticidade dinâmico

Concreto	Tempo de propagação (μs)	Velocidade da onda (km/s)	Módulo de elast. dinâmico (GPa)
C1-ref	44,87	4,32	40,30
C1-30	45,08	4,29	39,44
C1-50	45,22	4,06	39,13
C2-ref	44,59	4,37	42,23
C2-100	47,94	4,06	32,67

A partir dos dados da Figura 54, observa-se que o concreto C1-ref obteve uma propagação de 44,87 μs (microsegundos), enquanto o C1-30 obteve uma propagação de 45,08 μs (variação de 0,47% a mais em relação ao C1-ref) e no C1-50, o tempo médio de propagação foi de 45,22 μs (acrécimo de 0,78% em relação ao C1-ref e 0,31% em relação ao C1-30).

No grupo C2, houve um acréscimo de 7,51% do valor médio do tempo de propagação do C2-0 em relação ao C2-100. De forma geral, houve um acréscimo do tempo de propagação na medida em que a quantidade de agregado reciclado foi aumentada. Tal propriedade se deu pelo aumento do número de vazios do concreto com o aumento de agregados reciclados, o que ocasiona uma maior dificuldade para a onda se propagar no interior do concreto.

Analisando as velocidades de onda dos concretos (Figura 55), percebe-se que houve, de forma geral, um decréscimo da velocidade da onda com o aumento da quantidade de agregados reciclados no concreto. Nos grupos C1 e C2, os concretos sem agregados reciclados foram os que obtiveram os maiores valores: 4,32 km/s para o C1-ref e 4,37 km/s para o C2-ref. Soares *et al.* (2014) afirma que a velocidade da onda é um indicador indireto da porosidade, onde quanto menor é a velocidade da onda, maior é a porosidade do concreto. Pode-se sugerir,

desta forma, junto com os resultados de absorção, que a porosidade aumentou com a incorporação de agregados reciclados de concreto.

Figura 54 – Tempos de propagação de onda nos concretos

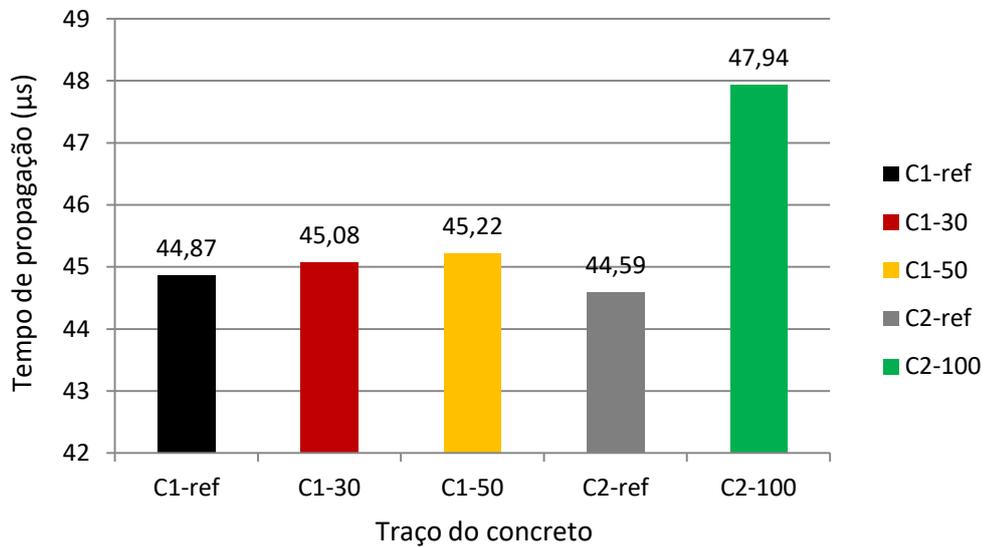
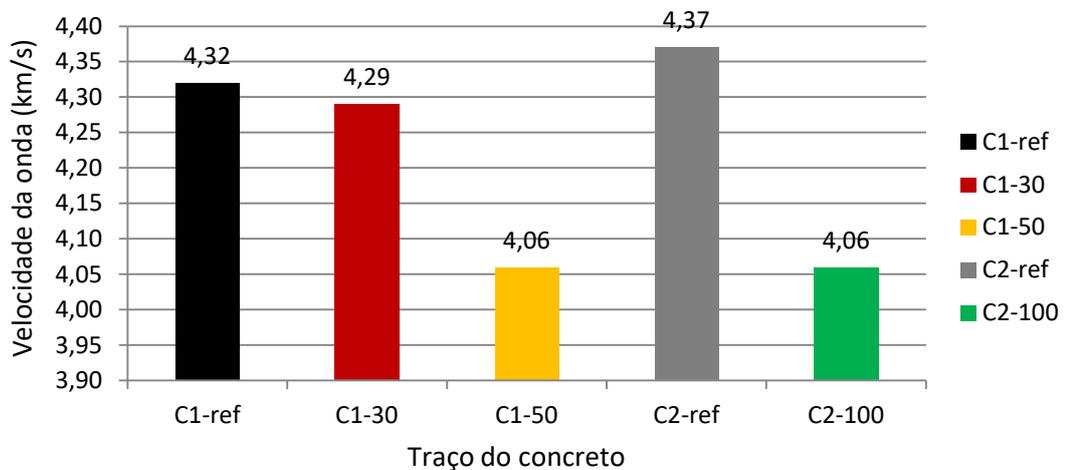
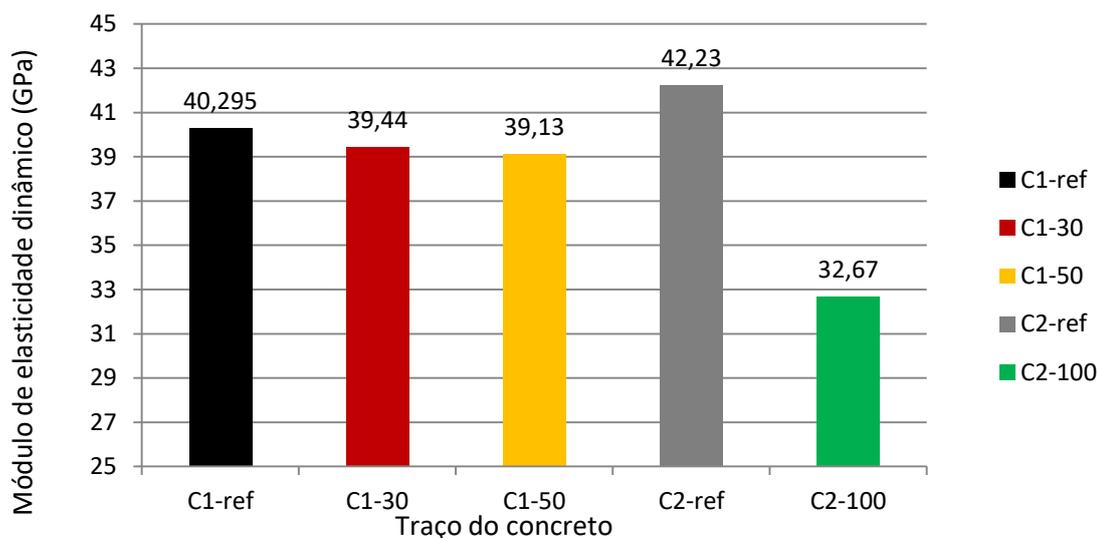


Figura 55 – Velocidades de onda dos concretos



De acordo com a Figura 56, no grupo 1, assim como nas outras variáveis, houve uma diminuição do módulo de elasticidade na proporção do aumento da quantidade de agregados reciclados. O concreto C1-ref apresentou um módulo de elasticidade 2,18% maior que o C1-30 e 2,99% maior que o C1-50. No grupo 2, o traço C2-ref obteve um módulo de 42,23 GPa, enquanto o C2-100 obteve 32,67 GPa, apresentando uma diferença de 9,56 GPa.

Figura 56 – Módulos de elasticidade dinâmicos



4.2.2.5 Módulo de elasticidade estático

Com relação ao módulo de elasticidade estático, houve uma diminuição dos valores em virtude do aumento do percentual de agregados reciclados. No grupo C1, houve um decréscimo proporcional à quantidade de agregado reciclado, do módulo de elasticidade do concreto C1-ref em relação aos concretos C1-30 e C1-50, em 3,07% e 7,33%, respectivamente, conforme Tabela 29. O detalhamento dos resultados obtidos está exposto no Apêndice I.

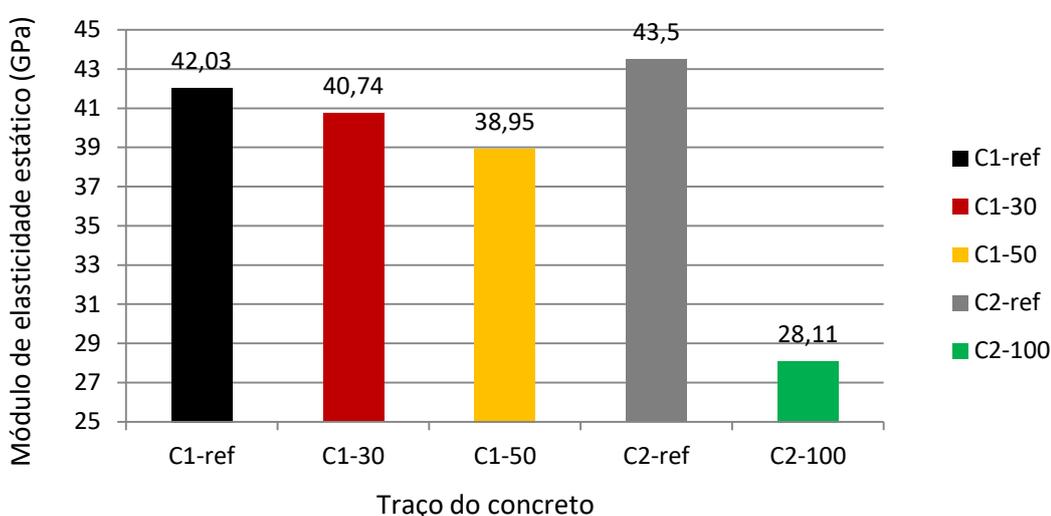
No grupo C2, o concreto C2-100 obteve um decréscimo de 35,38% do módulo de elasticidade estático, em relação ao concreto C2-ref. A Figura 57 ilustra graficamente a diferença entre os módulos de elasticidade estáticos dos concretos.

Os resultados apresentaram coerência com a literatura pesquisada. Em sua pesquisa, Li (2004) encontrou um decréscimo do módulo de elasticidade com o aumento do percentual de agregados reciclados, mas esse decréscimo não foi linear. Houve um decréscimo de 40% do módulo de elasticidade do concreto com 25% de agregado reciclado e uma diminuição de 45% no concreto com 100% com agregado reciclado. Na pesquisa de Evangelista e Brito (2007) houve uma diminuição de 3,7% do módulo de elasticidade do concreto com 30% de AR, em comparação ao concreto sem AR, tendo um resultado muito próximo da presente pesquisa. Soares (2014) obteve uma diminuição de 5,8% com 25% de AR e 11,3% com 100% de AR.

Tabela 29 – Módulos de elasticidade estáticos

Concreto	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Variação em relação ao concreto sem AR (C1-0/C2-0)
C1-ref	42,03	-
C1-30	40,74	- 3,07%
C1-50	38,95	- 7,33%
C2-ref	43,5	-
C2-100	28,11	- 35,38%

Figura 57 – Módulos de elasticidade estáticos



4.2.2.6 Resistência à tração por compressão diametral

Conforme resultados da Tabela 30, observa-se que não houve uma tendência nos valores de resistência à tração em relação à quantidade de agregados reciclados. No grupo C1, houve uma estabilização da resistência à tração por compressão diametral do concreto C1-ref para o concreto C1-30, cuja diferença foi de apenas 0,06 MPa, o que corresponde a um acréscimo de 0,99%. No concreto C1-50, entretanto, houve um decréscimo de 0,93 MPa, em comparação com o C1-ref, equivalente a uma diminuição de 15,42% da resistência. No grupo C2, houve uma diminuição de 4,43% da resistência à tração, do concreto C2-ref para o C2-100.

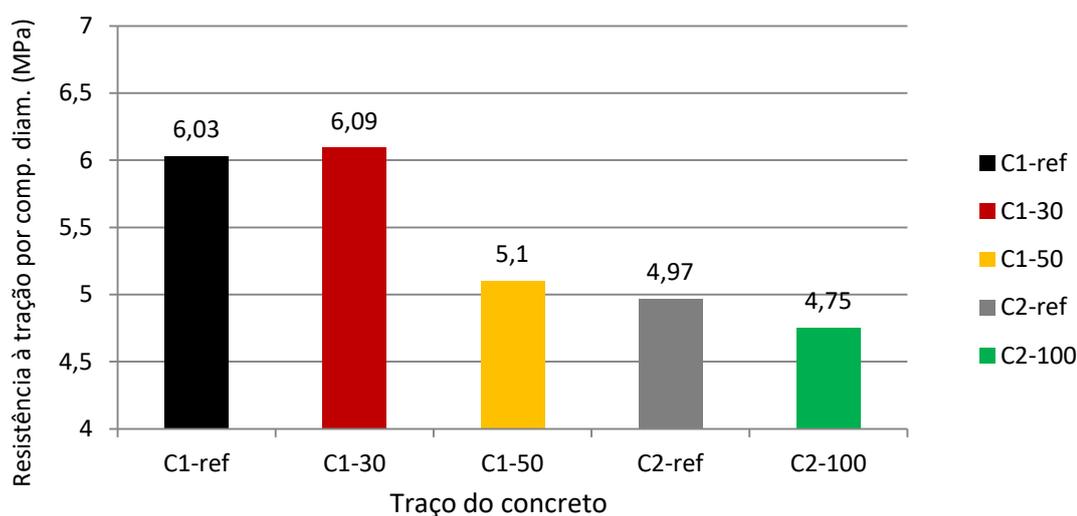
É importante comentar, de acordo com os dados detalhados no Apêndice J, que para os concretos do grupo C2 (C2-ref e C2-100), foram rompidos apenas dois corpos de prova para compor a média da resistência à tração. Ocorreu então, entre os corpos de prova do concreto C2-ref, uma diferença de 1,57 MPa, resultando num coeficiente de variação de 22%. Desta

forma, pode ter havido uma distorção no valor final. A Figura 58 ilustra graficamente os resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 30 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 105 dias de cura

Concreto	Carga de ruptura à compressão diametral (Kgf)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Varição em relação ao concreto sem AR (C1-ref/C2-ref)
C1-ref	18.662,50	6,03	-
C1-30	18.995,75	6,09	+ 0,99%
C1-50	15.881,25	5,10	- 15,42%
C2-ref	15.531,50	4,97	-
C2-100	14.818,50	4,75	- 4,43%

Figura 58 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 105 dias de cura



4.2.3 Correlações entre os resultados

4.2.3.1 Resistência à compressão simples e esclerometria

De forma geral, os dados de esclerometria estabeleceram uma correlação com os dados de resistência à compressão simples. Inicialmente, verificou-se qual o tipo de equação obteve o maior coeficiente de determinação (R^2), e concluiu-se que a equação linear obteve os melhores resultados para todas as correlações. O coeficiente de determinação indica o poder de explicação da equação, ou seja, o quanto a equação explica a correlação entre as amostras.

Observando inicialmente a correlação entre as médias do índice esclerométrico médio (IEM) e a resistência à compressão simples (Figura 59), obteve-se um $R^2 = 0,8088$ e a equação linear

$2,3585x - 35,542$. Viera Filho (2007) encontrou um coeficiente de determinação (R^2) = 0,88, entre os dados de resistência à compressão simples (RCS) e esclerometria, através de uma equação de tendência linear. Em uma segunda observação (Figura 60), foram colocados os 210 dados referentes a todos os ensaios de esclerometria e resistência à compressão simples, nas idades de cura de 24 horas, 7 dias e 28 dias e obteve-se um $R^2 = 0,7558$ e uma equação $2,0912x - 24,709$.

O coeficiente de correlação (R), com os dados da primeira observação (Figura 59), calculado pela raiz quadrada do coeficiente de determinação, foi de 0,90. Isso quer dizer que existe uma relação muito forte de linearidade entre as variáveis: índice esclerométrico médio (IEM) e resistência à compressão. Considerando todos os valores individuais, obteve-se $R = 0,87$, tendo uma forte relação de linearidade entre as variáveis.

Também foram analisadas as retas de regressão a partir das correlações entre a resistência e o IEM por traço de concreto (Figuras 61 e 62). Dessa forma foram obtidos coeficientes (R^2) maiores, ou seja, com maior poder de explicação. Observa-se que o concreto com maior dispersão foi o C1-ref, obtendo um $R^2 = 0,7878$. De forma geral, todos os outros concretos (C1-30, C1-50, C2-ref e C2-100) obtiveram coeficientes de determinação maiores que 0,85 ($R^2 > 0,85$), sugerindo fortes correlações entre as propriedades.

As correlações por idade e grupo dos concretos estão localizadas no Apêndice A.

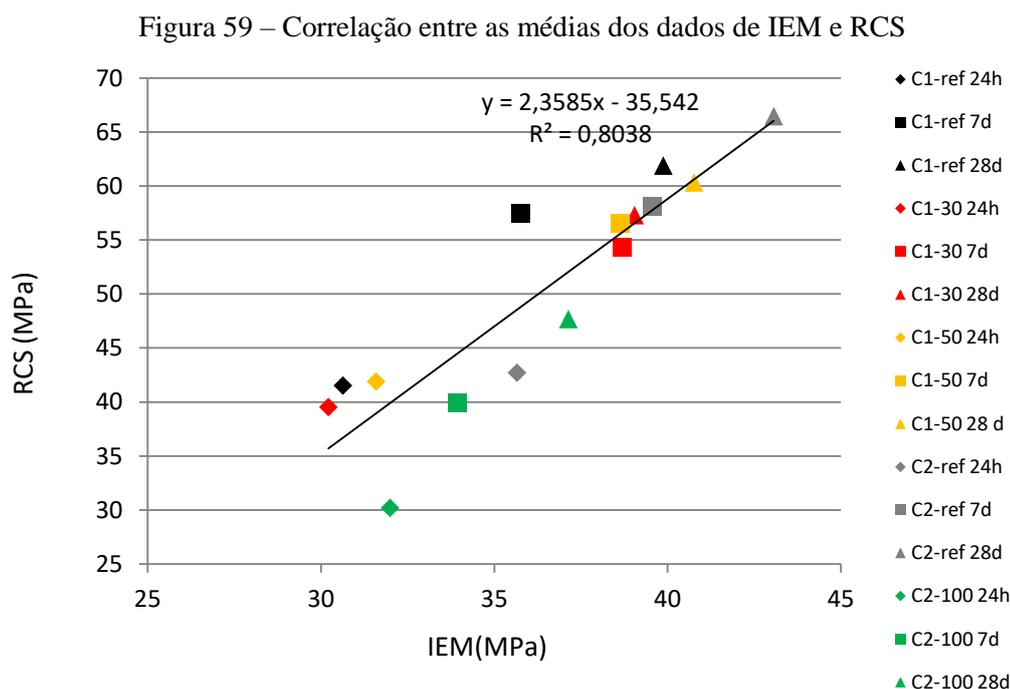


Figura 60 – Correlação entre os dados individuais dos corpos de prova de IEM e RCS

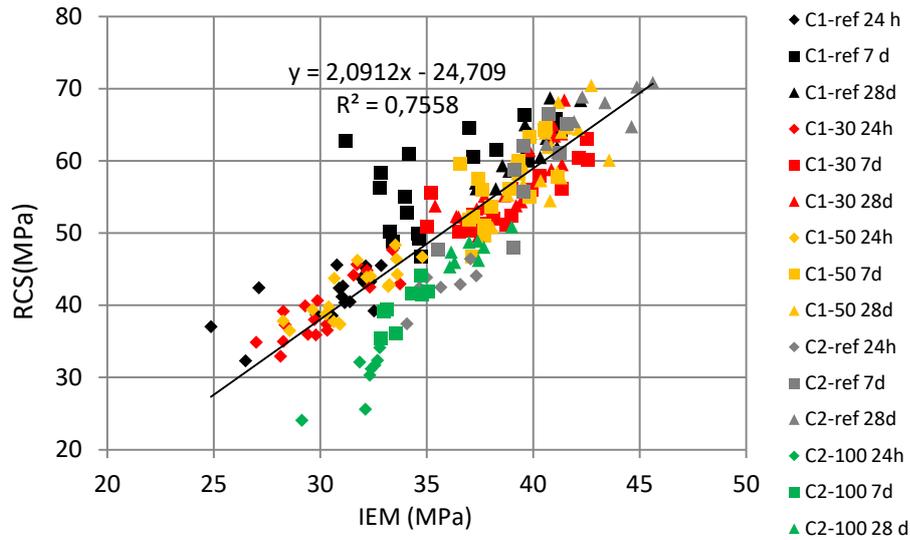


Figura 61 – Retas de regressão das correlações entre RCS e IEM por concreto, grupo C1

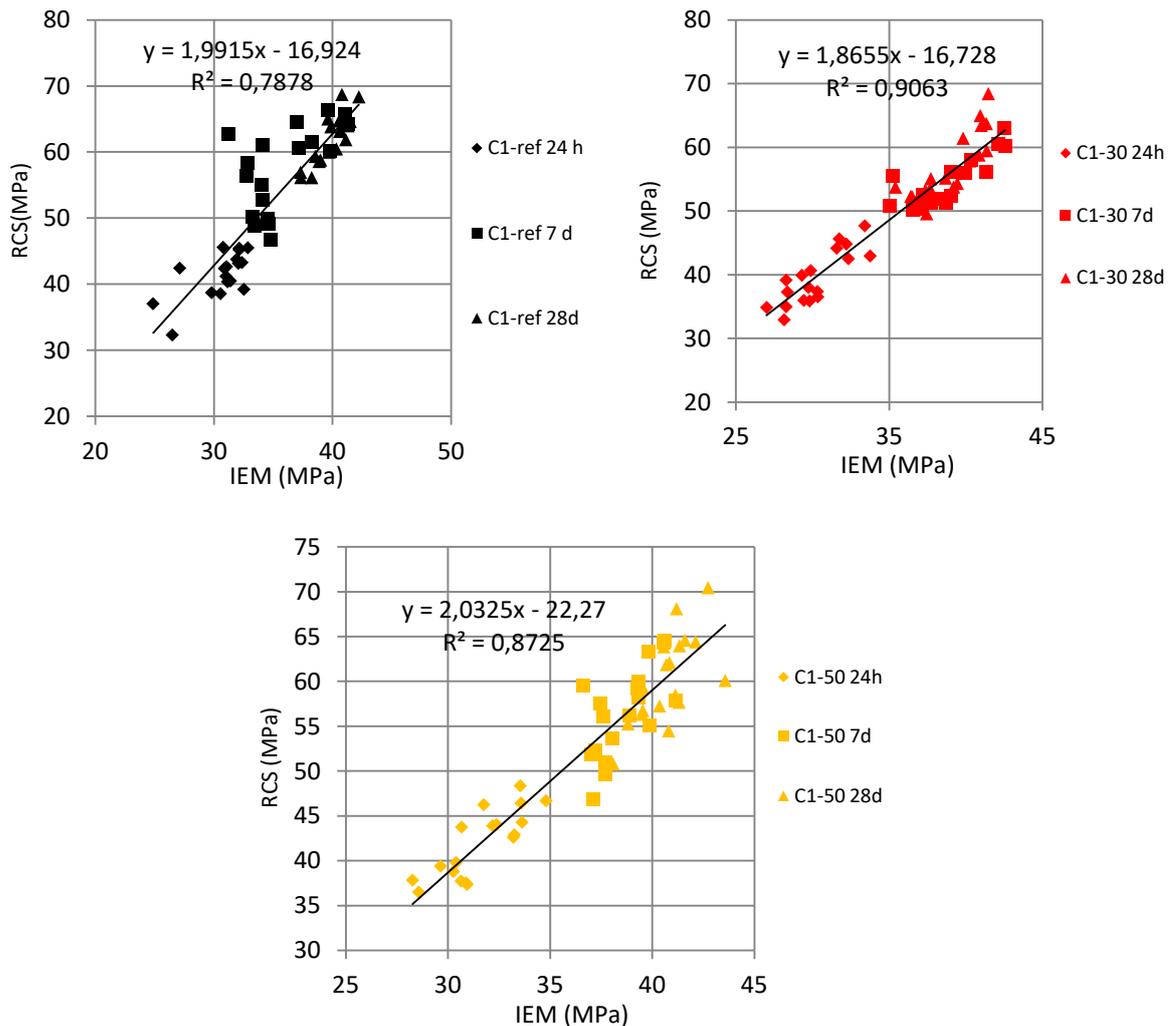
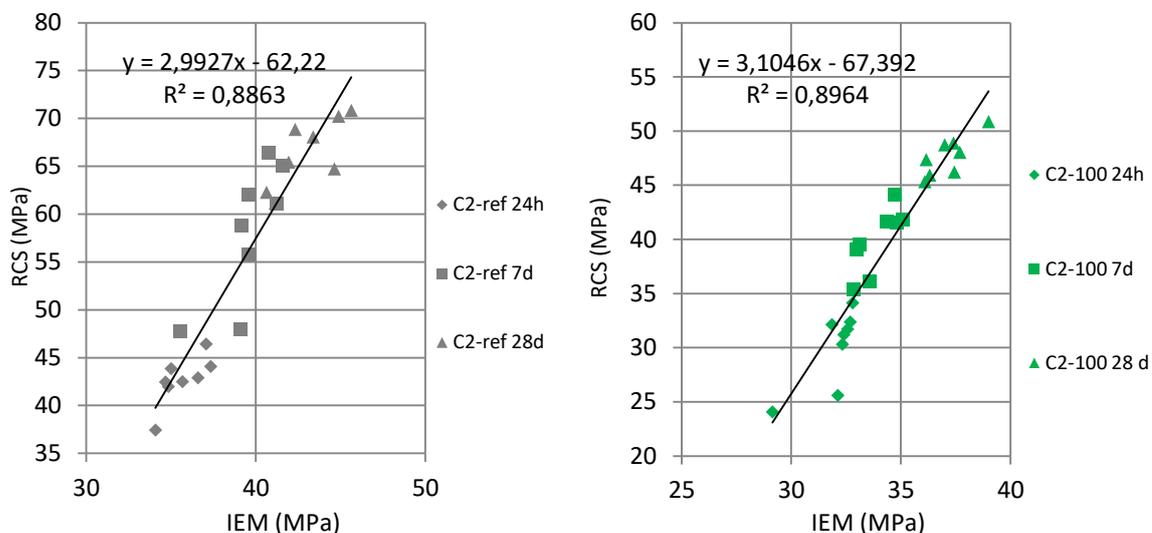


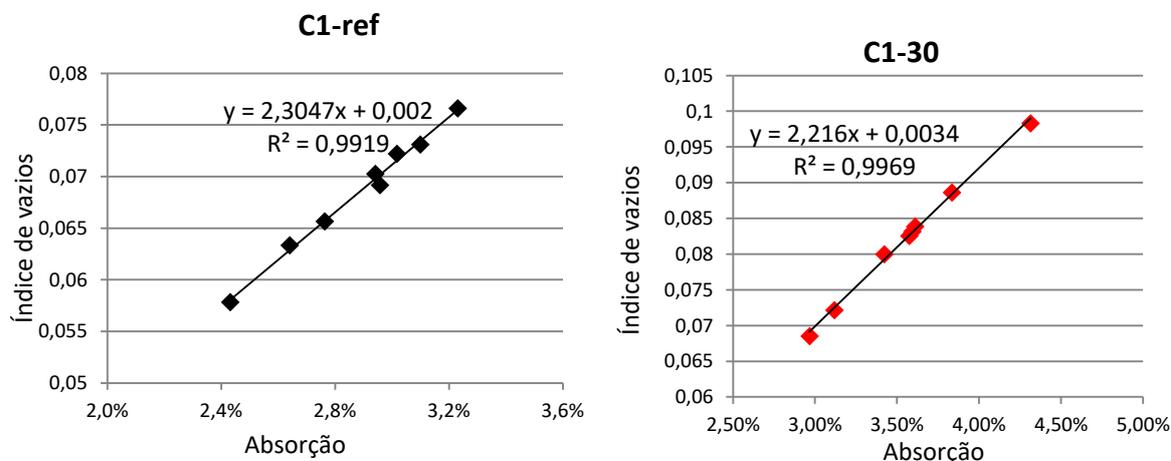
Figura 62 – Retas de regressão das correlações entre RCS e IEM por concreto, grupo C2



4.2.3.2 Absorção

Foi verificada, durante a análise dos dados do ensaio de absorção, como esperado, uma forte correlação entre a absorção e o de índice de vazios do concreto. Na Figura 63 estão expostos gráficos da correlação entre essas variáveis dos concretos do grupo C1, e, na Figura 64, estão expostos do grupo C2. Em todas as figuras, observa-se um $R^2 > 0,90$, que significa que, além de uma forte correlação de linearidade, as equações explicam quase perfeitamente a correlação entre as variáveis.

Figura 63 – Correlações entre o índice de vazios e absorção – grupo C1



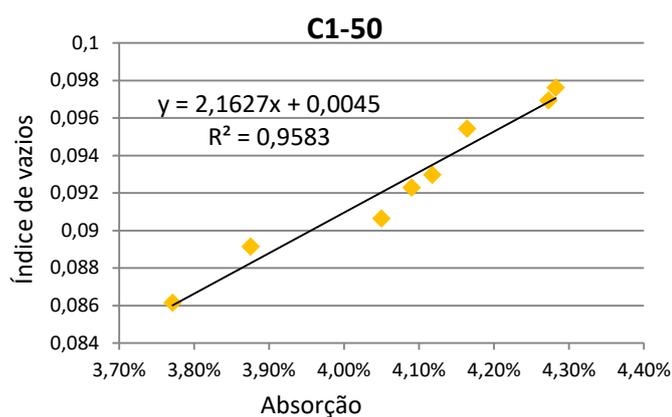
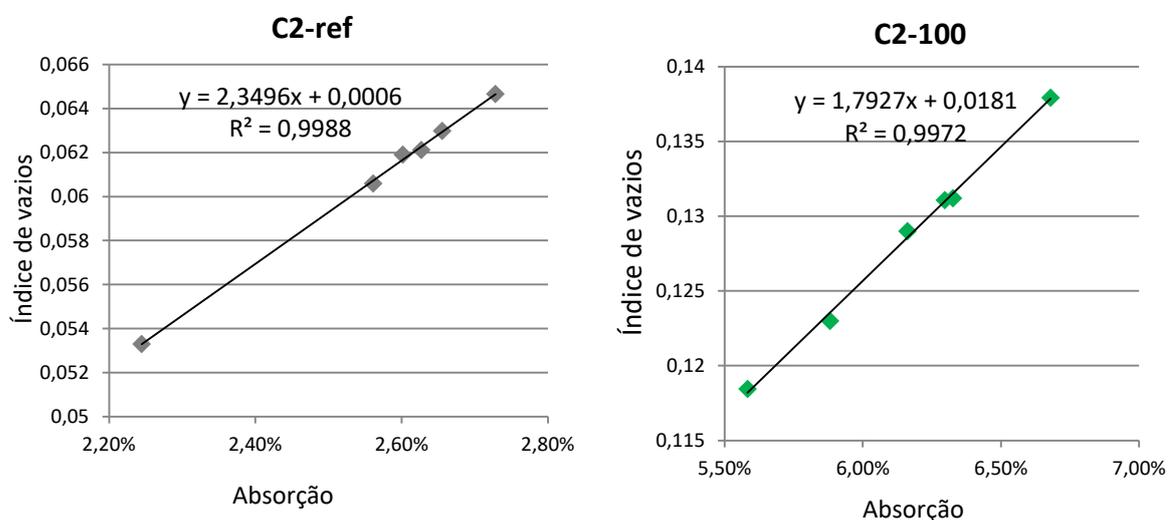
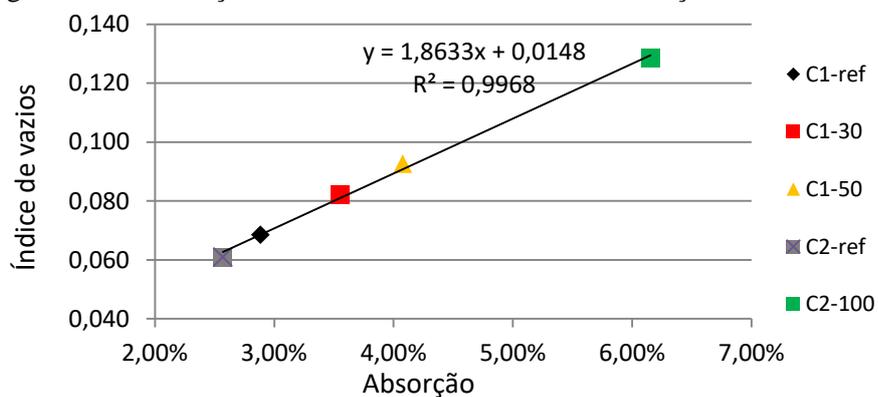


Figura 64 – Correlações entre o índice de vazios e absorção – grupo C2



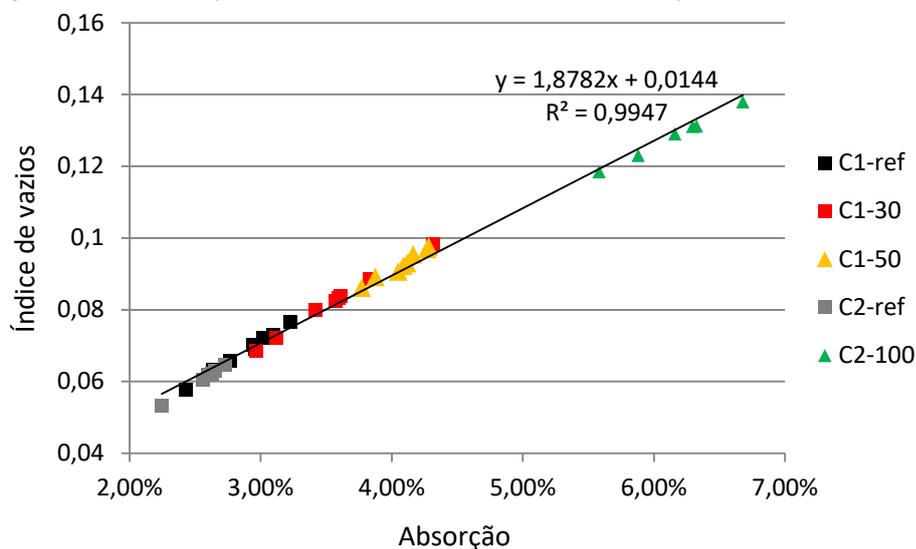
Entre as médias dos valores de absorções e índice de vazios, mesmo existindo características diferentes entre os concretos do grupo C1 e C2, foi observada uma correlação entre os valores, como mostra a Figura 65:

Figura 65 – Correlação entre as médias dos dados de absorção e índice de vazios



Colocando todos os dados individuais, por corpo de prova, também obteve-se uma ótima correlação entre as variáveis (Figura 66). Foi observado um $R^2 = 0,9947$, próximo ao coeficiente de determinação do gráfico considerando somente as médias ($R^2 = 0,9968$).

Figura 66 - Correlação entre os dados individuais de absorção e índice de vazios



4.2.3.3 Módulo de elasticidade

Os resultados médios de módulo de elasticidade não estabeleceram uma boa correlação com as médias dos resultados de resistência à compressão simples aos 105 dias de cura (RCS). Isso pode ter ocorrido devido a dois fatores: o primeiro seria que, enquanto o módulo de elasticidade, sendo estático ou dinâmico, apresentou uma diminuição à medida que a quantidade de agregado reciclado foi aumentada, na resistência à compressão simples, aos 105 dias, o concreto C1-30 apresentou maior resistência que o C1-ref, por exemplo. Além disso, um segundo fator pode ter sido o fato dos dados concretos do grupo C2 terem apresentado uma linearidade diferente dos do grupo C1, como mostra a Figura 67. Os coeficientes de determinação das retas de regressão linear dos módulos com a resistência à compressão foram $R^2 = 0,6616$ no módulo de elasticidade estático (MEE) e $R^2 = 0,566$ com o módulo de elasticidade dinâmico (MED).

Foi encontrada uma forte correlação entre os módulos de elasticidade elástico e dinâmico, explicada através da equação $y = 1,6846x - 26,616$ e com um $R^2 = 0,9821$, conforme a Figura 68. Em módulo, os dados das duas variáveis obtiveram valores próximos entre si, como mostra a Tabela 31. O concreto que apresentou uma maior discrepância entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico foi o C2-100, com uma diferença de 4,56 GPa.

Figura 67 – Correlação entre os módulos de elasticidade e resistência à compressão simples aos 105 dias

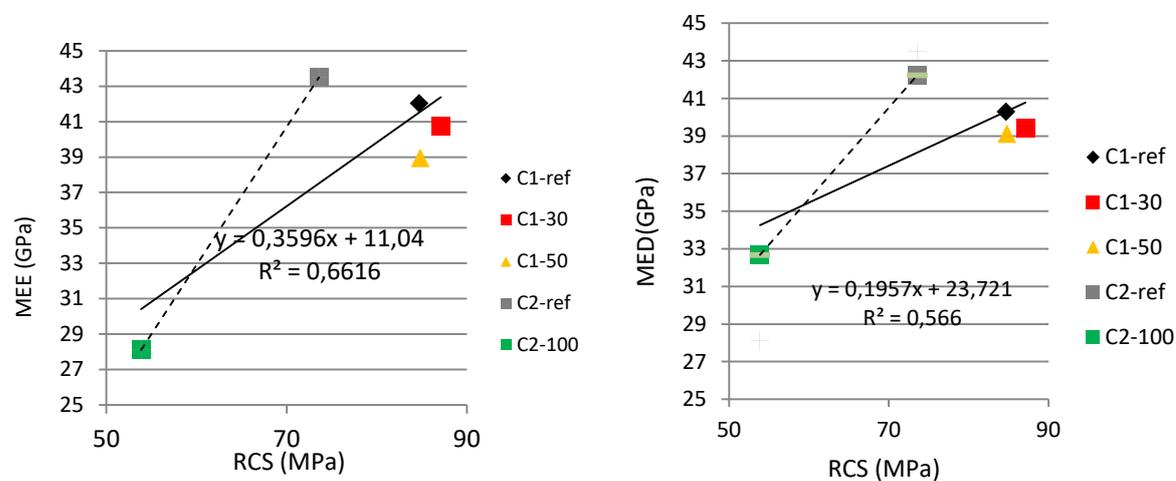


Figura 68 – Correlação entre módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico

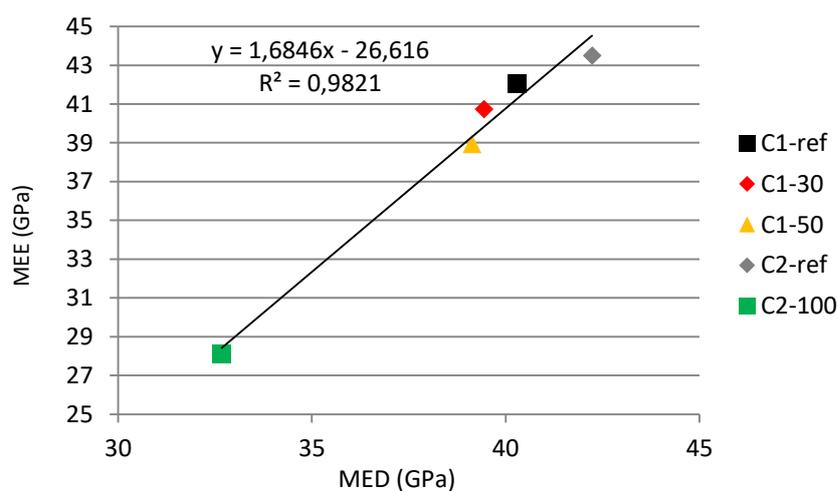
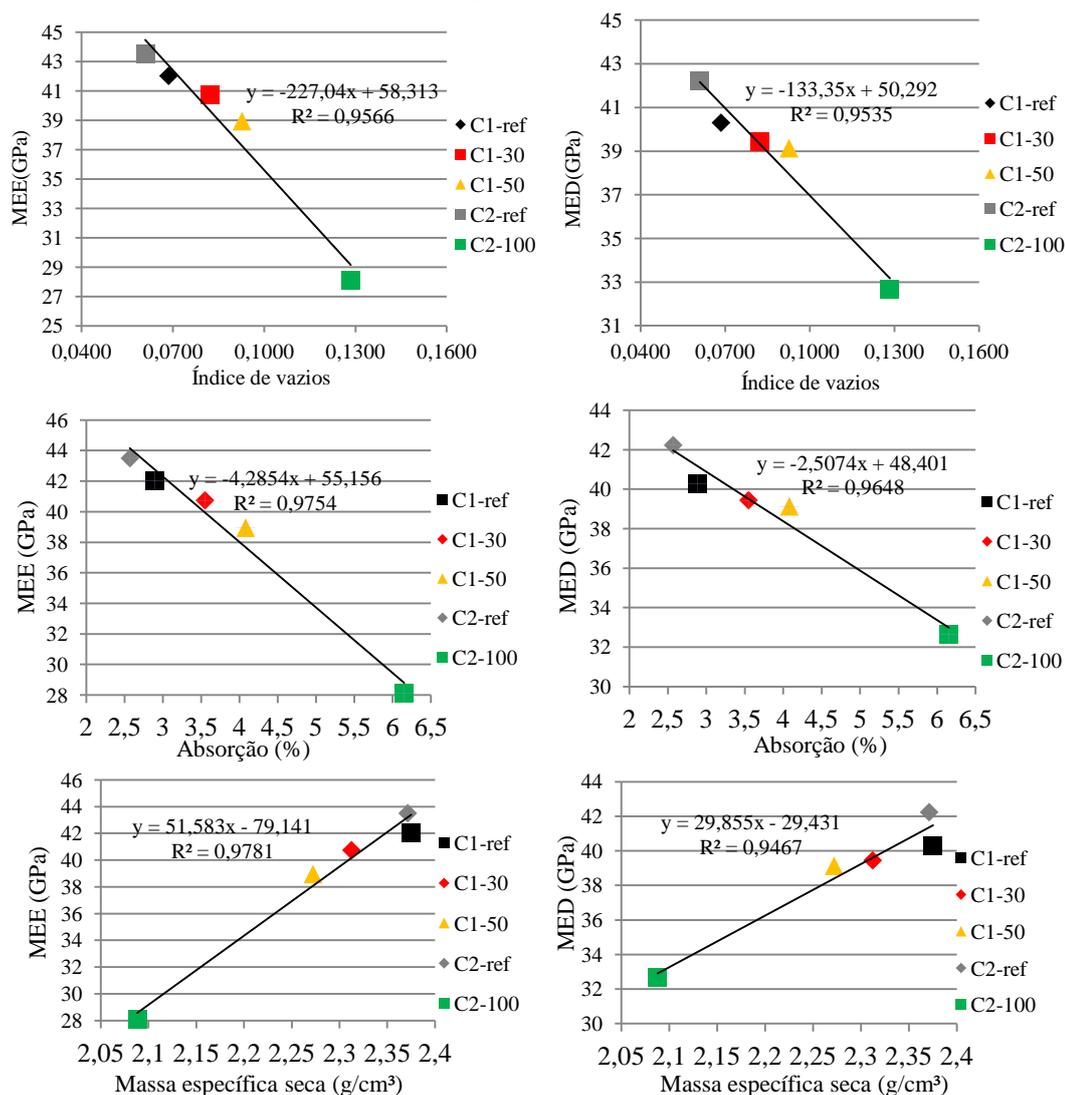


Tabela 31 – Resultados de módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico

Concreto	Módulo de elast. estático - MEE (GPa)	Módulo de elast. dinâmico - MED (GPa)	Diferença MEE - MED (GPa)	Razão MEE/MED
C1-ref	42,03	40,29	1,74	1,04
C1-30	40,74	39,44	1,30	1,03
C1-50	38,95	39,13	-0,18	1,00
C2-ref	43,5	42,23	1,27	1,03
C2-100	28,11	32,67	-4,56	0,86

Os módulos de elasticidade estabeleceram boas correlações com o índice de vazios, a absorção e a massa específica seca dos concretos. A Figura 69 mostra as retas de regressão linear entre o MEE e MED e as outras propriedades, onde todos os coeficientes de determinação ficaram acima de 0,90.

Figura 69 - Regressões lineares entre os módulos de elasticidade e índice de vazios, absorção e massa específica seca



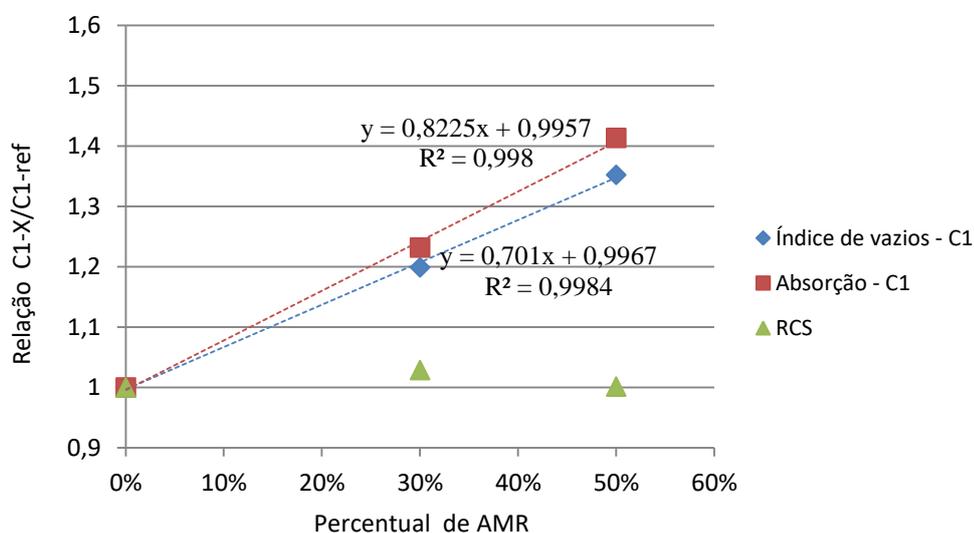
4.2.3.4 Impacto da incorporação de agregados reciclados nas propriedades do concreto

Com relação aos resultados de ensaios de resistência à compressão simples (RCS), tração por compressão diametral e esclerometria, percebeu-se que não houve uma tendência clara de decréscimo ou acréscimo dos valores com o aumento da porcentagem de agregados reciclados. A análise estatística com os dados de resistência à compressão simples mostrou que houve semelhanças estatísticas entre as amostras em algumas idades de cura. Entre a RCS e a porcentagem de AMR, o coeficiente de determinação encontrado foi $R^2 < 0,1$.

Com relação ao ensaio de absorção, entretanto, houve uma clara tendência de aumento dos valores à proporção do aumento de agregados reciclados. Houve também um aumento do índice de vazios numa proporção semelhante, propriedade que está diretamente correlacionada com a absorção.

A Figura 70 mostra a relação entre o aumento do índice de vazios e da absorção com o aumento da quantidade de agregados reciclados. As relações apresentadas se referem aos concretos do grupo C1, pois a relação a/c entre os concretos foram muito semelhantes entre eles. A relação C1-X/C1-ref é a razão entre o valor do ensaio do concreto com agregado reciclado (C1-X) em relação ao concreto sem agregado reciclado (C1-ref). Por exemplo, em um ponto na reta de tendência do índice de vazios, o percentual de agregado miúdo reciclado (AMR) no concreto foi 30% e a relação C1-X/C1-ref foi 1,20. Isso quer dizer que o concreto com 30% de AMR (C1-30) apresentou um índice de vazios 1,2 vezes (20%) superior ao concreto sem agregado reciclado (C1-ref).

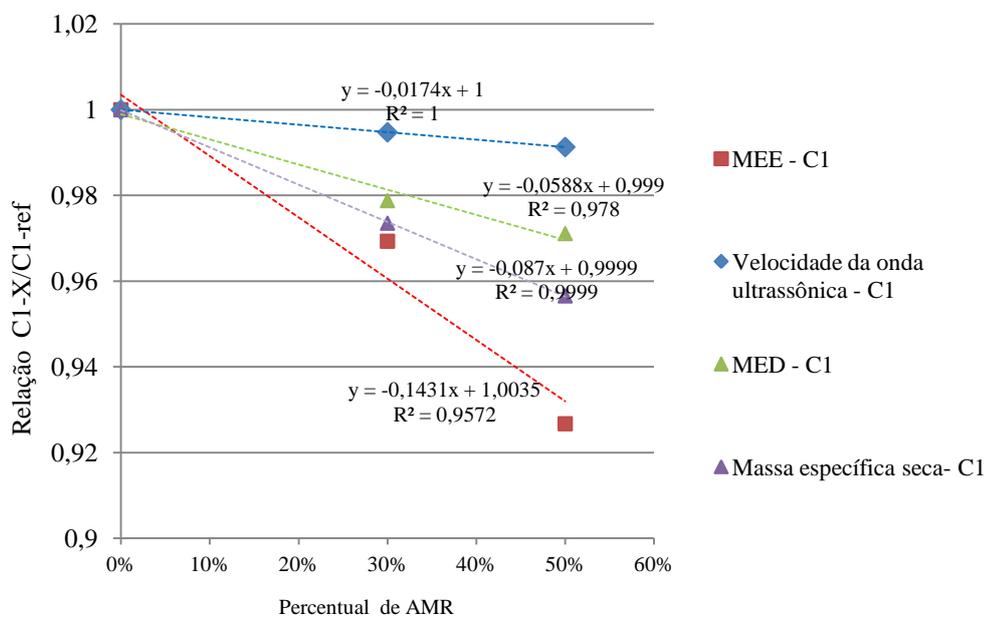
Figura 70 – Aumento do índice de vazios e absorção com o aumento de agregados reciclados



A Figura 71 mostra a diminuição da velocidade da onda ultrassônica, onde, segundo Soares *et al.* (2014), é uma indicadora da porosidade: quanto menor é a velocidade da onda, maior é a porosidade. Deste modo, pode-se afirmar que a incorporação de agregado reciclado de concreto pode ser responsável pelo aumento de sua porosidade. A diminuição da velocidade da onda também é responsável pela queda do módulo de elasticidade dinâmico (MED).

Tais fatos têm impactos no MEE e na massa específica do concreto. O aumento da porosidade do concreto causa uma diminuição de sua rigidez, e há então uma queda direta no módulo de elasticidade estático.

Figura 71 – Diminuição dos módulos de velocidade e da velocidade de onda com o aumento de agregados reciclados



Esses resultados se mostraram semelhantes aos apresentados por Soares *et al.* (2014), que fez a mesma comparação, com substituições de agregado reciclado graúdo em 0%, 25% e 100%. Na reta de regressão linear com os valores de velocidade ultrassônica, eles encontraram um valor de coeficiente de determinação $R^2 = 0,9993$, enquanto o encontrado neste trabalho foi $R^2 = 1,00$. Nos valores de módulo de elasticidade, os autores encontraram um $R^2 = 0,9095$, enquanto o módulo de elasticidade dinâmico obteve um $R^2 = 0,978$ e o estático $R^2 = 0,9572$.

Ainda segundo o autor, a incorporação de agregado reciclado de concreto está correlacionada com a diminuição do módulo de elasticidade, entretanto não existe um consenso quanto à resistência à compressão simples. Tal fato foi observado nesta pesquisa, onde foi encontrada uma relação direta entre o módulo de elasticidade e a porcentagem de agregado reciclado, mas tal relação não ocorreu com a resistência à compressão simples.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões principais

Com relação às propriedades dos agregados reciclados, os módulos de finura do agregado fino natural (AFN) e do agregado fino reciclado (AFR) apresentaram valores semelhantes. Entretanto, a forma lamelar dos agregados reciclados contribuiu para aumento da absorção, do índice de vazios, e diminuição da massa específica e do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com eles.

O teor de material pulverulento das amostras dos agregados naturais atendeu os limites estabelecidos na NBR 7211:2009, que são de 5% para agregados miúdos e 1% para agregados graúdos. Como esperado, os agregados reciclados obtiveram valores de material pulverulento maiores que esses limites: o AFR apresentou 8,50% deste tipo de material, enquanto o AR 4,8 apresentou 5,83% e o AR 6,3 5,91%, ou seja, todos ultrapassaram o limite de 5% para agregados miúdos. Tais valores, entretanto, variaram em conformidade com a literatura pesquisada. O aumento do teor de material pulverulento interferiu no aumento da relação a/c, principalmente no concreto C2-100.

Os valores de massa específica dos agregados reciclados foram menores em relação aos agregados naturais. Entretanto, foram considerados normais, visto que estão próximos aos valores da literatura. Verificou-se um decréscimo de 7% no valor da massa específica do agregado fino reciclado (AFR) em comparação com o agregado fino natural (AFN).

Foi verificado um aumento da absorção de água dos agregados reciclados em comparação com os agregados naturais. O AFR apresentou uma absorção de 12,65% contra 0,53 do AFN, ou seja, absorveu 23 vezes mais água que o agregado natural. Tal característica foi repassada para a matriz dos concretos produzidos, e assim como a forma dos grãos, foi um fator que influenciou no aumento da absorção e diminuição da massa específica dos concretos com agregados reciclados.

A fixação do abatimento de tronco de cone na dosagem dos concretos, naturalmente, levou a uma variação das relações água/cimento. Tal variação, para os concretos do grupo C1, ou seja, C1-ref, C1-30 e C1-50, foi pequena, visto que as relações a/c foram 0,360, 0,362 e 0,367, respectivamente. Para os concretos C2-ref e C2-100, entretanto, houve uma considerável diferença, pois a relação a/c do concreto C2-ref foi de 0,397, enquanto a do C2-100 foi de

0,451. O aumento do consumo de água do C2-100 pode ter influenciado significativamente na diminuição de seu desempenho nos ensaios de resistência à compressão simples e diametral.

Os valores de massa unitária dos concretos no estado fresco mostraram um decréscimo à medida que se aumentou a quantidade de agregados reciclados. Do traço C1-30 para o C1-ref houve uma diminuição de 3%, enquanto do C1-50 para o C1-ref a diminuição foi de 7,5%. O C1-50 apresentou um decréscimo da massa unitária em 12%, em comparação com o C2-ref. Tal desempenho era esperado, uma vez que os agregados reciclados têm densidades menores que os naturais, e conseqüentemente, os concretos reciclados também apresentariam densidades menores em relação aos concretos com agregados naturais.

Com relação aos ensaios de resistência à compressão simples, em relação aos concretos do grupo C1, houve um pequeno decréscimo de resistência do concreto C1-ref para o C1-30. Aos 28 dias, considerando os valores médios, o concreto C1-30 apresentou uma diminuição de 9% no valor da resistência, enquanto do C1-ref para o C1-50 esta diminuição foi de 2,5%. Do C2-ref para o C2-100 houve uma queda de 28% na resistência para os valores médios.

A análise estatística com a ANOVA e o teste T para médias, nos concretos do grupo C1, mostrou que em 10 das 12 situações houve semelhanças estatísticas entre as amostras. Como a relação a/c entre os concretos foi muito próxima, pode-se afirmar que a incorporação de agregados reciclados de concreto não interferiu no comportamento do mesmo quanto à resistência à compressão simples.

Houve um aumento na absorção e diminuição na massa específica dos concretos à medida que se aumentou o teor de agregados reciclados. Os traços C1-ref e C2-ref, sem agregado reciclado, foram os que apresentaram os menores valores de absorção e os maiores valores de massa específica, em comparação com os outros traços. Verificou-se um aumento de absorção em 0,66% do concreto C1-30 em relação ao C1-ref, e em 1,19 do concreto C1-50 para o C1-30. Do concreto C2-ref para o C2-100 houve um aumento de 3,58%.

Não foi observada uma relação entre a incorporação dos agregados reciclados e a resistência à tração por compressão diametral no grupo C1. Os concretos C1-ref e C1-30 apresentaram valores semelhantes, sendo 6,03 MPa e 6,09 MPa, respectivamente. No grupo C2, houve uma diminuição de 4,43% no valor da resistência à tração do concreto C2-100 em relação ao C2-ref.

Observou-se uma forte correlação entre os resultados de resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio. Utilizando as médias das amostras, pode-se afirmar que, em 80% dos casos, a correlação entre estes resultados pode ser expressa através de uma equação linear. Utilizando os resultados individuais, por corpo de prova, o poder de explicação foi de 76%.

Houve correlações muito fortes entre o índice de vazios de concreto e a absorção, todas próximas de $R^2 = 1$ e ambas as propriedades aumentaram em proporção com a quantidade de agregados reciclados. No grupo C1, o concreto que mais absorveu água foi o C1-50, enquanto no grupo C2 foi o C2-100.

Foi observada uma diminuição dos módulos de elasticidade, tanto o dinâmico como o elástico, com o aumento da porcentagem de agregados reciclados. Tal fator deve ser considerado no cálculo estrutural, uma vez que a diminuição do módulo de elasticidade significa num aumento da deformação do concreto.

Também foi verificada uma queda da velocidade de pulso da onda ultrassônica, que interferiu na queda do módulo de elasticidade estático. Foi verificado um $R^2 = 1,00$ na relação linear entre a quantidade de agregado miúdo reciclado e a queda da velocidade.

O aumento do índice de vazios variando com o aumento da porcentagem de agregados reciclados é um dos fatores que explica não só o aumento da absorção, mas também a diminuição da massa específica e do módulo de elasticidade do concreto, pois tais fatores diminuem sua rigidez e também dificultam a transmissão da onda ultrassônica, no ensaio dinâmico.

Ao final, pode-se afirmar que não houve interferência do uso desse material na resistência à compressão simples do concreto, nem na tração por compressão diametral. Houve, entretanto, um aumento da absorção e uma diminuição do módulo de elasticidade e da massa específica, mas que não são capazes de inviabilizar tecnicamente do uso de agregados reciclados de concreto.

Tais variações em algumas propriedades devem ser consideradas na elaboração de projetos, principalmente em obras enterradas ou que fiquem expostas a agentes agressivos, uma vez que um aumento do índice de vazios e da absorção pode significar uma maior porosidade, e conseqüentemente um ambiente mais propício para a entrada desses agentes, que podem

causar patologias nos concretos. A queda da velocidade da onda ultrassônica também é um indicador do aumento da porosidade do concreto.

5.2 Propostas para futuras pesquisas

- Realizar uma pré-lavagem dos agregados reciclados com o intuito de diminuir a quantidade de material pulverulento, e assim comparar os resultados das propriedades de agregados reciclados e concretos produzidos com o material lavado e o material não lavado. Espera-se uma melhora do desempenho dos concretos com o agregado reciclado lavado.
- Além de realizar uma comparação das propriedades dos concretos com agregados após a lavagem, também realizar um estudo da variação do consumo de cimento com essa etapa. Espera-se que o agregado lavado tenha um valor de material pulverulento menor, e assim demande menos água de amassamento, e conseqüentemente, diminua o consumo de cimento.
- Realizar uma pesquisa com mais teores de substituições de agregados naturais pelos reciclados. Uma sugestão é realizar substituições de 0%, 10%, 20%, 30%, 50% e 100%, dependendo da viabilidade da pesquisa.
- Programar o ensaio de ultrassom em conjunto com os ensaios de esclerometria e resistência à compressão simples, visto que os dois primeiros são ensaios não destrutivos e, deste modo, será possível encontrar correlações mais precisas com o módulo de elasticidade dinâmico, e acompanhar a evolução dos valores de acordo com os tempos de cura.
- Realizar ensaios de durabilidade com concretos com agregados reciclados, como por exemplo: resistência à penetração de sulfatos, cloretos, profundidade de carbonatação, diminuição das dimensões do concreto (encurtamento) e resistividade elétrica. Tais propriedades são fundamentais para avaliar a durabilidade dos concretos reciclados frente à ação de agentes agressivos, pois são causadores da despassivação e da corrosão do aço no concreto armado, o que compromete a vida útil dos elementos estruturais.
- Avaliar a possibilidade de ensaios de carregamento em peças fabricadas com concretos reciclados. Pode-se produzir pórticos de pequeno porte e avaliar a deformação, o aparecimento de fissuras e outras propriedades dos concretos sob carregamento.

REFERÊNCIAS

ABCIC – Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto. **A Indústria de Pré-Fabricados de Concreto**: informativo de desempenho anual. Rio de Janeiro, 2013.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Anuário Brasileiro do Concreto**. 3^a ed., 2014.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222: **Argamassa e concreto** – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. NBR 7584. **Concreto endurecido** – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NM 67. **Concreto** – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

_____. NM 51. **Agregado graúdo** – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 52. **Concreto** – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NM 46. **Agregados** – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. NBR 9062. **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 5739. **Concreto** – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NM 53. **Agregado graúdo** – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 7211: **Agregados para concreto** – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ABELPRE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. 2014. 120p.

AMORIM, P.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability. **ACI Materials Journal**. 2012. Instituto Politécnico de Engenharia, Lisboa, 2012. n. 44. p. 195–204.

ARAÚJO JUNIOR, E.L. **Uso de resíduos de construção e demolição (RCD) em estacas de compactação para melhoramento de solos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de Pernambuco. Universidade de Pernambuco, 2010.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM-E 178-02. Standard practice for dealing with outlying observation. West Conshohocken, Pensilvânia, 2002.

BARBOSA JÚNIOR, A.S. **Estudo da utilização de agregado reciclado em misturas de concreto de cimento Portland para pavimentação**. Campinas, UNICAMP, 2008. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hermigón de árido reciclado en su aplicación como hermigón armado**. Barcelona: UPC, 1996. 223 p. Tese (doutorado) - Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camin, Canal i Ports. Universitat Politècnica de la Catalunya.

BENETTI, J.K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2012.

BRITO, J.; ROBLES, R. Recycled aggregate concrete methodology for estimate its long term properties. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**. 2008. Universidade de Lisboa, v. 43, ed. 1, 2010.

BRITO, J.; SOARES, D.; FERREIRA, J.; PACHECO, J. *In situ* materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures. **Construction and Building Materials**. 2014. Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2014. n.71. p.237-245.

BUTTLE, A.M. **Concreto produzido com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência na idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, 2001.

BUTTLE, A.M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, 2007.

CARRIJO, P.M. **Análise da influência de massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. 129p.

CAVALCANTI, N.L.Q. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de resíduos de construção civil**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica de Pernambuco. Universidade de Pernambuco, Recife, 2014.

CAVALHEIRO, A.P. **Contribuição para implementação de agregado reciclado de concreto em uma empresa de pré-fabricados**. Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2011.

CBIC – Câmara Brasileira da indústria da construção. **Construção Civil: Desempenho e Perspectivas**. Informativo Econômico. Brasília, 2014.

COCHRAN, K.; TOWNSEND, T. Estimating C&D Generation. **C&D World News**. Gainesville, set. 2013.

COUTO, A.M.; COUTO, J.P. Os benefícios ambientais e a racionalização do efeito aprendizagem na indústria da pré-fabricação. In: III CONGRESSO NACIONAL DE CONSTRUÇÃO, 2007. 17-19 Dez, Coimbra, Portugal.

DE JUAN, M.S. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural** (study on the use of recycled aggregate in structural concrete). Tese (doutorado) - Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Espanha; 2005.

EL DEBS, M.K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. EESC. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

EXTEBERRIA, M.; VÁSQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**. 2007. Universitat Politècnica de Catalunya. v. 37, 2007. p.735 – 742.

EVANGELISTA, L. BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2007. n. 29. p. 397-401.

FUEYO, L. Equipos de trituración, molienda y clasificación. Tecnología, Diseño y Aplicación (equipment for crushing, grinding and classification. Technology, design and implementation). **Editorial Rocas y Minerales**; 2002.

GOMES, M.; DE BRITO, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. **Materials and Structures Journal**. 2009. Universidade de Lisboa, 2009, v. 42, ed. 5. p. 663-675.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. **Cement and Concrete Research**. Polytechnic University of Catalunya, 2012. n.32. p. 1301-1311.

GONÇALVES, R.D.C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto** – um novo material para dosagens estruturais. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001. 132 p.

GONÇALVES, M.S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para produção de novos concretos**. Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2011.

HANSEN, T.C. **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316 p. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregates concrete, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem de controle de concreto**. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1993. 349p.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. Capítulo 29. In: ISAIA, Geraldo (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 1 ed. IBRACON, 2007.

HUSSAIM, R.R.; ISHIDA, T. Development of numerical for FEM computation of oxygen transport through porous media coupled with micro-cell corrosion model of steel in concrete structures. **Computers and Structures Journal**. 2010. v. 9, p. 639 – 647.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. Informativo econômico, 6^a edição, 2014.

ISAIA, G.C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 2005. IBRACON, vol. 1, 1600 p., São Paulo.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**. 2003. n. 33 703-711.

KHATIB, J.M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**. 2005. Sheffield Hallam University, 2003, n. 35, p.763-769.

KOU, S.C.; POON, C.S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 2010. n. 32. p. 649-654.

LEE, S.T. Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. **Waste Management**, 2009, n. 29, p. 2384-2391.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. 269 p.

LEVY, S.M. **Reciclagem do entulho da construção Civil, para utilização como agregados para argamassas e concretos**. São Paulo: USP, 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LIMA, J.A.R. **Proposição para diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassa e concreto**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 1999.

LIMA, R. S. **Aproveitamento de Resíduos de Construção na Fabricação de Argamassas**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba - CT.João Pessoa, 2005.

LOVATO, P.S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 180p.

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestruturas, propriedades e materiais**. 1ª Ed, São Paulo: IBRACON. 2008. 674 p.

KOU, S.C.; SHUI, Z.H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**. 2004. Hong Kong Polytechnic University, 2002, v.18, n. 6, p. 461-468.

KOU, S.C.; POON, C.S. Enhancing the durability of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**. 2012. Hong Kong Polytechnic University, n. 35, p. 69-76.

MARTÍN-MORÁLES, M.; ZAMORANO, M.; RUIZ-MOYANO, A.; VALVERDE-ESPINOSA, I. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE – 08. **Construction and Building Materials**. 2010. University of Granada, Granada, 2011, n. 25, p. 742-748.

MELHADO, S.B. BARROS, M.M.S.B. **Recomendações para a produção de estruturas de concreto armado em edifícios**. São Paulo. Projeto EPUSP/SENAI, 1998.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**, Editora Pini, 2º ed., p.828, 1997.

NUNES, D.G. **Carbonatação acelerada em concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

OLIVEIRA, D.; LIMA, M.; MEIRA, G.; LIRA, R.; PADILHA, M. Estudo do concreto utilizando agregado miúdo reciclado: Avaliação da Resistência Mecânica. In: II CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA. 2007. João Pessoa.

PEDRO, D.; EVANGELISTA, B.; BRITO, J. Performance of concrete made with aggregate recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process. **Materials and Structures**. Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2014. n. 48, v.12, p. 3965-3978.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto e Construções**. Ibracon. n. 53, p.14-19, jan, fev, mar. 2009.

PEREZ-BENEDICTO, J.A.; RÍO-MERINO, M.; PERALTA-CANUDO, J.L.; MATA, M.R.L. Características mecánicas de hermigonos con áridos reciclados procedentes de lós rechazos en prefabricación. **Materiales de Construcción**. 2012. Universidad de Zaragoza, vol. 62, 2012. p. 25-37.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos**. 1999. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

POON, C.S; SHUI, Z.H.; LAM, L. Effect of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**. n.18, ed. 6, p.461-468, 2004.

PRADO, D.M. **Propriedades físicas e mecânicas de blocos estruturais produzidos com agregados reciclados de concreto**. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, 2006. 140 p.

PROENÇA, F.T.T.C. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de agregados reciclados de resíduos da construção civil para o aproveitamento de obras para compactação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco. Escola Politécnica de Pernambuco, 2012.

RODRIGUES, C.B. **Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados mistos: avaliação das propriedades, físicas, mecânicas e térmicas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco. Escola Politécnica de Pernambuco, 2015.

RODRIGUES, C.R.S. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco. Recife, 2011. 119 p.

RODRIGUES, C.R.S.; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**. 2013. Universidade de Pernambuco. v. 14, n.1, p 99-111, 2014.

SAMPAIO, L.L. **Comportamento mecânico de resíduos beneficiados da construção e demolição utilizados na fabricação de concreto e estabilização de solos**. Recife: UNICAP, 2013, 100p. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica de Pernambuco.

SHI, C.; LI, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z. Performance enhancement of recycled aggregates concrete – A review. **Journal of Cleaner Production**. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, 2015. p. 1-7.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; DHIR, R.K. Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2. **Construction and Building Materials**. 2015. Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016. n.105. p. 144-156.

SOARES, D.; BRITO, J.; FERREIRA, J.; PACHECO, J. In situ materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures. **Construction and Building Materials**, Lisboa, n° 71, p. 237-245, 2014.

SOUZA, J.G.G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto** – Aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Brasília, 142 p., 2001.

Spanish Minister of Public Works. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (Spanish Structural Concrete Code); 2008.

TENÓRIO, J.J.L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2007.

TOKUDOME, M. A sustentabilidade da indústria de pré-fabricados. In: I ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, São Carlos, SP, Brasil, 2005.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de cloretos.** Dissertação (Mestrado) – UNISINOS. São Leopoldo. 2010, 129 p.

VIEIRA FILHO, J.O. **Avaliação da resistência à compressão de concreto através de testemunhos extraídos:** contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido os efeitos do broqueamento. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. v.1. 217 p.

WERLE, A.P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação.** Dissertação (Mestrado), UNISINOS. São Leopoldo. 2010, 195 p.

WERLE, A.P.; KAZMIERCZACK, C.S.; KULAKOWSKI, M.P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído.** 2011. UNISINOS, v.11, n. 2, 2011. p. 213-228.

WCH Industrial Ltda. Disponível em <http://www.wch.com.br/extruder/extruder.html>. Acesso em Set 2016.

APÊNDICE A – DADOS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS

Tabela A.1 – Detalhamento dos volumes de produção e geração de resíduos da indústria de pré-fabricados

Mês	Estaca centrifugada			Vigas e pilares			Lajes alveolares			Total			Resíduo/ produção (%)
	Produção total (m³)	Produção efetiva (m³)	Geração de resíduos (m³)	Produção total (m³)	Produção efetiva (m³)	Geração de resíduos (m³)	Produção total (m³)	Produção efetiva (m³)	Geração de resíduos (m³)	Produção total (m³)	Produção efetiva (m³)	Geração de resíduos (m³)	
jun/15	8,45	8,37	0,08	179,62	176,03	3,59	167,00	158,65	8,35	355,07	343,05	12,02	3,39
jul/15	67,60	66,92	0,68	781,48	765,85	15,63	1873,35	1779,68	93,67	2722,43	2612,46	109,97	4,04
ago/15	0,00	0,00	0,00	883,04	865,38	17,66	1764,80	1676,56	88,24	2647,84	2541,94	105,90	4,00
set/15	0,00	0,00	0,00	1050,34	1029,33	21,01	1752,40	1664,78	87,62	2802,74	2694,11	108,63	3,88
out/15	34,87	34,52	0,35	820,86	804,44	16,42	1388,00	1318,60	69,40	2243,73	2157,56	86,17	3,84
nov/15	81,11	80,30	0,81	850,20	833,20	17,00	1132,80	1076,16	56,64	2064,11	1989,65	74,46	3,61
dez/15	56,44	55,88	0,56	452,85	443,79	9,06	162,20	154,09	8,11	671,49	653,76	17,73	2,64
jan/16	0,00	0,00	0,00	632,90	620,24	12,66	656,80	623,96	32,84	1289,70	1244,20	45,50	3,53
fev/16	0,00	0,00	0,00	633,65	620,98	12,67	52,30	49,69	2,62	685,95	670,66	15,29	2,23
mar/16	0,00	0,00	0,00	645,26	632,35	12,91	0,00	0,00	0,00	645,26	632,35	12,91	2,00
abr/16	0,00	0,00	0,00	606,15	594,03	12,12	31,00	29,45	1,55	637,15	623,48	13,67	2,15
mai/16	12,00	11,88	0,12	832,95	816,29	16,66	225,40	214,13	11,27	1070,35	1042,30	28,05	2,62
jun/16	19,75	19,55	0,20	285,16	279,46	5,70	192,20	182,59	9,61	497,11	481,60	15,51	3,12
Total	280,22	277,42	2,80	8654,46	8481,37	173,09	9398,25	8928,34	469,91	18332,93	17687,13	645,80	-
Média	21,56	21,34	0,22	665,73	652,41	13,31	722,94	686,80	36,15	1410,23	1360,55	49,68	3,16

**APÊNDICE B – DETALHAMENTO DOS TRAÇOS DOS CONCRETOS
UTILIZADOS NA PESQUISA**

Tabela B.1 – Traços dos concretos utilizados no programa experimental

Concre- to	Massa no traço unitário (kg)								Aditivo (mL)	Água/ cimento	Teor de argamassa – α (%)
	Cimento	AFN	BN 12	BN 19	AFN	AR 4,8	AR 6,3	Água			
C1-0	1	1,999	0,592	1,091	0	0	0	0,360	6,02	0,360	0,547
C1-30	1	1,330	0,591	1,091	0,300	0,300	0	0,361	6,02	0,361	0,547
C1-50	1	0,991	0,591	1,091	0,500	0,500	0	0,367	6,02	0,367	0,547
C2-0	1	2,800	2,540	0	0	0	0	0,396	3,70	0,396	0,528
C2-100	1	0	0	0	2,8	0	2,54	0,451	3,70	0,451	0,528

**APÊNDICE C - DETALHAMENTO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO SIMPLES**

Tabela C.1 – Detalhamento dos valores de resistência à compressão simples

Idade de cura (dias)	Concreto	Número de corpos de prova	Valores de resistência à compressão simples (MPa)					Desvio padrão (σ)	Coeficiente de variação (%)
			Média	Valor mínimo	Valor máximo	Limite inf. (intervalo de conf. a 95%)	Limite sup. (intervalo de conf. a 95%)		
1	C1-ref	18	41,52	32,32	45,59	39,70	43,35	3,47	8,36
	C1-30	18	39,53	32,94	47,69	37,41	41,65	4,26	10,77
	C1-50	18	41,89	36,50	48,23	40,00	43,79	3,81	9,08
	C2-ref	8	42,71	37,44	46,43	40,58	44,84	2,55	5,97
	C2-100	8	30,20	24,08	34,14	27,27	33,13	3,50	11,61
7	C1-ref	18	57,46	46,78	66,36	54,23	60,61	6,49	11,29
	C1-30	18	54,36	50,17	62,98	52,39	56,34	3,97	7,31
	C1-50	18	56,52	46,80	64,54	54,02	59,01	5,02	8,87
	C2-ref	8	58,12	47,95	66,45	52,13	64,11	7,16	12,33
	C2-100	8	39,90	36,09	44,10	37,39	42,42	3,01	7,53
28	C1-ref	18	61,89	56,14	68,73	59,99	63,79	3,82	6,18
	C1-30	18	57,30	49,59	68,43	54,69	59,92	5,26	9,17
	C1-50	18	60,32	54,48	70,45	57,82	62,82	5,03	8,33
	C2-ref	8	66,46	61,18	70,85	63,44	69,48	3,61	5,43
	C2-100	8	47,68	45,34	50,88	46,15	49,22	1,84	3,86
105	C1-ref	18	84,69	78,10	90,40	82,99	86,39	3,42	4,04
	C1-30	18	87,13	80,80	94,92	85,38	88,87	3,51	4,02
	C1-50	18	84,81	77,66	92,04	83,01	86,60	3,61	4,27
	C2-ref	8	73,58	69,83	77,16	71,25	75,91	2,79	3,79
	C2-100	8	53,86	49,87	58,18	51,74	55,96	2,54	4,72

**APÊNDICE D - DETALHAMENTO DOS RESULTADOS DE ESCLEROMETRIA
POR CORPO DE PROVA**

D.1 Resultados de esclerometria do concreto C1- ref (1 dia)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	35730		45,52		32,87
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	34	36	33	1ª média: 32,87
	34	32	32	34	
	34	33	32	34	2ª média -
	34	30	32	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	35680		45,45		32,14
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	32	32	33	1ª média: 31,44
	33	32	32	31	
	25	30	32	28	2ª média: 32,14
	32	32	32	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	33490		42,66		31,07
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	25	33	30	32	1ª média: 30,7
	30	32	32	32	
	28	32	30	33	2ª média 31,07
	32	30	30	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	33880		43,16		32,07
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	32	35	28	1ª média: 32,11
	32	32	34	34	
	31	31	34	30	2ª média 32,07
	36	30	32	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	35550		45,22		32,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	34	32	32	1ª média: 32,40
	34	30	32	37	
	34	32	30	34	2ª média: 32,13
	32	32	30	32	

Nº CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	31690		40,37		31,16
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	28	33	31	30	1ª média: 31,16
	28	38	32	33	
	32	31	26	32	2ª média: -
	32	31	31,5	30	

Nº CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	33270		42,38		30,90
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	26	32	32	30	1ª média: 30,59
	32	29	33,5	32	
	30	32	32	33	2ª média: 30,90
	29	28	29	30	

Nº CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	31790		40,50		31,40
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	32	32	30	1ª média: 30,88
	32	32	34	34	
	26	29	32	30	2ª média: 31,20
	32	30	31	28	

Nº CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	25370		32,32		26,50
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	25	29	25	29	1ª média: 26,25
	25	28	28	28	
	29	28	28	26	2ª média: 26,50
	24	24	22	22	

Nº CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	34360		43,77		31,93
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	25	31	30	34	1ª média: 31,25
	32	32	32	31	
	32	34	32	32	2ª média: 31,93
	32	28	30	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	30280		38,57		30,56
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	33	31	30	1ª média: 30,56
	28	32	32	31	
	30	30	32	30	2ª média: -
	30	31	30	29	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	33980		43,29		32,38
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	33	33	32	1ª média: 32,38
	32	34	32	33	
	33	35	31	34	2ª média: -
	29	28	33	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	32340		41,20		31,03
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	34	32	32	1ª média: 31,03
	29	30	32,5	32	
	30	32	32	28	2ª média: -
	31	30	29	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	30790		39,22		32,53
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	32	33,5	33	1ª média: 31,03
	33	34	33	32	
	33	32	32	32	2ª média: -
	31	31	32	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	30400		38,73		29,82
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	33	28	32	1ª média: 29,88
	29	30	28	27	
	28	25	33	34	2ª média: 29,82
	31	25	32	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	35790		45,59		30,79
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	28	31	32,5	30	1ª média: 30,19
	31,5	32,5	32	25	
	28,5	31,5	29,5	32	2ª média: 30,79
	31	30	27	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	33310		42,43		27,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	25	28,5	28	27	1ª média: 31,03
	29,5	28	28	26,5	
	29	28	28	27	2ª média: -
	25	25	26	25,5	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	29080		37,04		24,88
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	25	26	21,5	27	1ª média: 25,28
	21,5	26	32	29,5	
	22	22	29	28	2ª média: 24,88
	23	23	23	26	

D.2 Resultados de esclerometria do concreto C1- ref (7 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	49290		62,79		31,20
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	37	32	34	1ª média: 32,19
	28	30	36	36	
	30	28	32	32	2ª média: 31,20
	30	34	30	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	50690		64,57		37,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	39	40	32	1ª média: 35,88
	38	41	32	38	
	34	38	36	32	2ª média: 37,00
	36	36	32	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	50430		64,24		41,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	41	40	42	39	1ª média: 41,31
	44	40	40	42	
	43	43	39	41	2ª média: -
	40	43	44	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	44230		56,34		32,79
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	37	34	28	1ª média: 41,31
	34	32	30	30	
	36	34	32	32	2ª média: -
	32	34	34	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	47190		60,11		39,75
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	42	39	41	1ª média: 39,75
	38	44	39	41	
	37	40	38	40	2ª média: -
	40	39	39	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	39360		50,14		33,27
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	40	33	36	1ª média: 33,69
	34	32	32	32	
	32	33	32	32	2ª média: 33,27
	36	32	36	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	36720		46,78		34,75
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	36	38	33	1ª média: 34,75
	35	34	35	33	
	38	38	33	32	2ª média: -
	34	34	33	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	36720		46,78		34,75
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	36	38	33	1ª média: 34,75
	35	34	35	33	
	38	38	33	32	2ª média: -
	34	34	33	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	48290		61,52		38,27
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	35	31	40	1ª média: 38,56
	35	39	40	31	
	42	43	42	42	2ª média: 38,27
	37	35	43	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	52090		66,36		39,60
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	31	31	40	1ª média: 36,82
	36	41	40	31	
	40	40	40	40	2ª média: 39,60
	40	40	40	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	43150		54,97		34,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	35	34	36	1ª média: 34,10
	40	38	30	36	
	33	38	30	32	2ª média: 34,00
	34	32	30	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	39160		49,89		34,57
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	41	31	32	1ª média: 34,75
	34	30	34	38	
	36	33	32	38	2ª média: 34,57
	35	36	36	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	38620		49,20		34,63
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	32	34	40	1ª média: 34,63
	34	34	30	39	
	38	34	32	35	2ª média: 34,63
	37	30	33	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	47900		61,02		34,15
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	29	32	38	1ª média: 34,31
	33	32	34	38	
	33	33	34	36	2ª média: 34,15
	34	37	36	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	45840		58,39		32,86
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	30	34	33	1ª média: 34,37
	38	30	37	33	
	32	32	38	30	2ª média: 32,86
	34	38	32	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	41440		52,79		34,09
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	33	32	36	1ª média: 34,00
	34	37	28	40	
	34	35	32	41	2ª média: 34,09
	33	30	30	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	38350		48,85		33,44
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	33	32	36	1ª média: 38,56
	38	34	32	35	
	32	34	34	30	2ª média: 38,27
	31	33	34	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	47550		60,57		37,19
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	36	38	41	1ª média: 37,19
	38	40	38	34	
	39	40	37	40	2ª média: 37,19
	34	32	40	30	

D.3 Resultados de esclerometria do concreto C1- ref (28 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	50110		63,83		39,88
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	40	41	40	1ª média: 39,88
	40	40	40	40	
	39	40	40	39	2ª média: -
	38	42	40	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	47100		60,00		39,71
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	38	37	40	1ª média: 39,56
	40	44	39	40	
	40	38	41	41	2ª média: 39,71
	40	40	41	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	50230		63,99		41,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	40	38	42	1ª média: 41,31
	40	40	40	42	
	40	41	42	45	2ª média: -
	42	41	44	44	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	46160		58,80		39,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	35	42	40	1ª média: 39,00
	40	40	36	41	
	40	39	40	40	2ª média: -
	40	36	37	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	44070		56,14		38,25
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	36	38	40	1ª média: 38,25
	36	37	39	40	
	40	40	38	35	2ª média: -
	35	38	40	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	45990		58,59		38,88
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	38	40	37	1ª média: 38,88
	38	40	38	37	
	39	42	40	38	2ª média: -
	37	40	40	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	53950		68,73		40,80
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	43	44	40	1ª média: 40,80
	42	40	40	40	
	36	40	43	44	2ª média: -
	41	43	36	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	46590		59,35		38,56
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	40	40	38	1ª média: 38,56
	36	40	38	36	
	40	40	37	36	2ª média: -
	38	39	38	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	51040		65,02		39,63
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	40	40	40	1ª média: 39,63
	42	40	40	38	
	40	40	39	39	2ª média: -
	41	39	39	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	48580		61,89		41,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	44	40	38	1ª média: 41,13
	41	42	40	42	
	40	42	43	40	2ª média: -
	40	39	42	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	47480		60,48		40,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	42	40	39	1ª média: 40,33
	39	43	40	42	
	38	44	39	37	2ª média: -
	41	40	41	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	44080		56,15		37,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	35	37	33	1ª média: 37,10
	39	35	40	37	
	38	36	40	34	2ª média: 37,33
	38	37	38	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	49630		63,22		40,69
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	39	41	39	1ª média: 40,69
	44	40	39	38	
	42	40	42	39	2ª média: -
	43	40	40	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	44700		56,94		37,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	38	40	37	1ª média: 37,31
	37	39	38	38	
	38	37	37	37	2ª média: -
	35	37	37	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	53670		68,37		42,23
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	43	37	43	1ª média: 41,56
	45	42	33	43	
	46	40	41	44	2ª média: 42,23
	44	39	40	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	50800		64,71		40,56
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	42	41	41	1ª média: 40,56
	43	42	40	40	
	40	42	38	38	2ª média: -
	39	40	39	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	49560		63,13		40,63
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	42	39	40	1ª média: 40,63
	40	43	39	41	
	41	40	39	42	2ª média: -
	40	41	43	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	50740		64,64		41,50
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	42	39	41	1ª média: 41,50
	43	44	41	40	
	44	40	42	40	2ª média: -
	41	40	40	43	

D.4 Resultados de esclerometria do concreto C1- 30 (1 dia)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	29340		37,38		30,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	30	32	30	1ª média: 30,31
	32	34	31	30	
	30	30	30	30	2ª média: -
	30	30	28	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	27470		34,99		28,27
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	28	26	24	32	1ª média: 28,88
	32	30	32	31	
	27	24	30	28	2ª média: 28,27
	30	28	30	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	28690		36,55		30,34
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	30	32	30	1ª média: 30,06
	26	30	32	30	
	30	28	30	32	2ª média: 30,34
	33	30	30	26	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	34680		44,18		31,57
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	32	30	34	1ª média: 30,90
	33	31	30	33	
	31	28	26	31	2ª média: 31,57
	26	33	34	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	37440		47,69		33,40
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	33	38	34	1ª média: 33,70
	36	33	33	35	
	32	34	35	33	2ª média: 33,40
	31	33	31	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	28180		35,90		29,80
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	30	32	29	1ª média: 29,56
	30	31	30	26	
	28	30	28	30	2ª média: 29,80
	30	28	30	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	35190		44,83		32,20
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	34	38	28	1ª média: 32,56
	30	33	36	33	
	33	36	32	30	2ª média: 32,20
	32	34	32	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	29840		38,01		29,73
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	26	30	29	1ª média: 29,50
	28	30	27	31	
	30	30	31	30	2ª média: 29,73
	31	29	30	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	33380		42,52		32,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	26	28	24	33	1ª média: 31,31
	32	31	34	33	
	32	32	32	34	2ª média: 32,33
	31	31	33	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	33730		42,97		33,75
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	35	34	33	1ª média: 33,75
	33	34	32	35	
	36	37	34	33	2ª média: -
	33	34	33	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	31340		39,92		29,30
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	28	32	26	1ª média: 29,92
	31	26	28	27	
	33	33	27	33	2ª média: 29,30
	30	34	28	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	30750		39,17		28,27
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	29	28	30	1ª média: 28,80
	34	31	25	31	
	26	28	33	27	2ª média: 28,27
	28	26	25	27	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	31920		40,66		29,67
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	32	32	34	1ª média: 29,88
	30	33	22	28	
	33	28	32	30	2ª média: 29,67
	29	29	28	27	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	25860		32,94		28,14
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	27	28	29	1ª média: 28,30
	29	28	26	27	
	29	28	25	26	2ª média: 28,14
	28	31	33	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	35840		45,66		31,73
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	32	28	33	1ª média: 31,50
	33	34	33	33	
	29	30	31	34	2ª média: 31,73
	31	28	32	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	29280		37,30		28,36
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	28	33	28	28	1ª média: 28,94
	26	31	30	27	
	33	28	30	27	2ª média: 28,36
	31	27	30	26	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	27380		34,88		27,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	28	31	27	28	1ª média: 27,25
	26	25	25	29	
	26	26	25	28	2ª média: 27,00
	30	28	28	26	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	28250		35,99		29,43
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	28	28	30	31	1ª média: 29,44
	29	26	30	29	
	33	27	28	28	2ª média: 29,43
	31	32	29	32	

D.5 Resultados de esclerometria do concreto C1- 30 (7 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	41120		52,38		39,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	44	38	36	1ª média: 39,00
	34	44	40	38	
	40	40	36	42	2ª média: 39,00
	32	38	46	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	49440		62,98		42,53
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	46	40	48	38	1ª média: 42,12
	44	44	44	40	
	44	46	40	38	2ª média: 42,53
	44	42	40	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	40250		51,27		37,12
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	40	44	35	1ª média: 35,70
	35	36	39	36	
	33	30	32	35	2ª média: 37,12
	30	32	37	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	43630		55,58		35,21
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	37	34	31	1ª média: 34,70
	38	36	33	31	
	38	35	36	32	2ª média: 35,21
	36	30	34	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	41250		52,55		37,21
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	38	40	41	1ª média: 37,06
	36	38	30	35	
	40	42	38	35	2ª média: 37,21
	34	40	35	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	44080		56,15		39,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	34	40	45	1ª média: 39,38
	36	41	42	39	
	38	36	40	37	2ª média: 39,00
	36	42	38	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	39960		50,90		35,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	33	35	35	1ª média: 34,75
	33	33	37	37	
	34	35	38	38	2ª média: 35,00
	34	31	33	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	39920		50,85		36,93
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	38	42	38	1ª média: 37,56
	38	41	36	36	
	36	36	34	36	2ª média: 36,93
	37	35	42	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	40810		51,99		38,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	37	42	37	1ª média: 38,13
	37	42	40	37	
	35	33	40	42	2ª média: -
	38	37	37	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	43980		56,03		39,94
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	42	39	35	1ª média: 39,94
	44	40	37	40	
	43	41	41	39	2ª média: -
	36	40	38	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	44090		56,17		41,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	42	42	40	1ª média: 41,00
	44	40	38	45	
	43	41	40	39	2ª média: 41,33
	36	40	42	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	39380		50,17		36,53
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	36	38	40	1ª média: 36,10
	37	40	38	40	
	35	35	36	32	2ª média: 36,53
	38	30	33	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	45530		58,00		40,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	43	39	44	1ª média: 40,31
	39	41	42	40	
	41	38	41	38	2ª média: -
	43	37	40	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	40260		51,29		37,69
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	40	42	37	1ª média: 37,69
	39	35	38	40	
	36	35	38	35	2ª média: -
	36	41	38	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	47470		60,47		42,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	39	42	41	1ª média: 42,13
	44	41	44	41	
	45	45	40	43	2ª média: -
	39	42	40	44	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	47220		60,15		42,56
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	44	44	41	1ª média: 42,56
	44	45	42	40	
	45	45	40	39	2ª média: -
	46	43	40	43	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	39560		50,39		37,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	40	35	37	1ª média: 37,13
	39	40	35	38	
	38	37	38	39	2ª média: -
	37	34	34	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	40220		51,24		38,73
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	33	38	40	1ª média: 38,38
	37	38	38	39	
	36	39	39	41	2ª média: 38,73
	40	35	40	39	

D.6 Resultados de esclerometria do concreto C1- 30 (28 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	43250		55,10		37,71
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	32	41	39	1ª média: 37,63
	40	42	35	38	
	37	35	40	38	2ª média: 37,71
	40	37	33	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	46160		58,80		40,86
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	43	39	42	1ª média: 40,19
	36	44	40	42	
	42	41	38	40	2ª média: 40,86
	41	40	35	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	42230		53,80		39,20
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	40	37	40	1ª média: 38,80
	40	40	42	37	
	39	38	41	33	2ª média: 39,20
	37	39	40	38	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	53720		68,43		41,47
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	45	39	40	1ª média: 41,80
	45	41	41	47	
	44	42	41	45	2ª média: 41,47
	40	39	40	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	46700		59,49		41,36
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	43	42	37	36	1ª média: 41,31
	44	40	46	40	
	41	42	44	42	2ª média: 41,36
	38	43	40	43	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	50040		63,75		41,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	41	41	42	38	1ª média: 41,31
	44	46	46	45	
	46	37	40	36	2ª média: 41,33
	40	40	42	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	38930		49,59		37,44
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	38	35	39	1ª média: 37,44
	39	37	39	42	
	33	38	41	37	2ª média: -
	32	35	39	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	41070		52,32		36,40
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	33	40	35	1ª média: 36,40
	38	35	37	38	
	36	38	36	35	2ª média: -
	37	37	35	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	51020		64,99		40,94
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	41	43	42	42	1ª média: 40,94
	40	44	42	42	
	39	40	40	40	2ª média: -
	40	38	40	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	42000		53,50		37,67
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	38	40	37	1ª média: 37,67
	32	37	39	40	
	37	36	40	40	2ª média: -
	36	36	36	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	45440		57,89		40,25
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	41	40	39	40	1ª média: 40,25
	39	40	42	40	
	39	45	43	41	2ª média: -
	37	38	39	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	49810		63,45		41,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	43	45	39	40	1ª média: 41,00
	39	45	43	41	
	42	39	42	42	2ª média: -
	37	38	40	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	41870		53,34		37,36
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	33	41	42	1ª média: 37,31
	33	32	39	41	
	32	37	40	38	2ª média: 37,36
	40	38	40	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	42210		53,77		35,40
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	37	31	33	1ª média: 35,75
	35	40	42	34	
	32	33	41	37	2ª média: 35,40
	33	38	38	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	48230		61,44		39,82
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	32	38	41	1ª média: 39,81
	41	44	38	43	
	38	44	40	41	2ª média: 39,82
	36	35	40	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	43320		55,18		38,67
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	36	42	39	1ª média: 38,31
	40	41	37	35	
	38	41	37	33	2ª média: 38,67
	39	41	38	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	41000		52,23		36,50
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	37	35	35	1ª média: 37,13
	38	37	41	35	
	37	38	42	36	2ª média: 36,50
	36	37	34	38	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	42670		54,36		39,44
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	41	43	38	1ª média: 39,44
	40	41	37	38	
	39	39	40	37	2ª média: -
	42	37	41	38	

D.7 Resultados de esclerometria do concreto C1- 50 (1 dia)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	33670		42,89		33,25
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	30	33	35	1ª média: 33,25
	33	32	38	33	
	32	36	32	34	2ª média: -
	32	33	31	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	30450		38,79		30,27
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	32	32	35	1ª média: 30,56
	30	28	35	31	
	30	30	29	30	2ª média: 30,27
	30	29	29	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	29330		37,36		30,93
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	33	32	30	1ª média: 31,30
	36	32	32	29	
	30	33	28	33	2ª média: 30,93
	31	30	31	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	34560		44,03		32,38
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	33	33	34	1ª média: 32,38
	32	34	31	33	
	31	34	31	33	2ª média: -
	31	31	34	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	36300		46,24		31,75
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	33	31	33	1ª média: 31,75
	32	30	32	32	
	30	33	32	32	2ª média: -
	30	30	32	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	29460		37,53		30,88
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	32	30	30	1ª média: 30,88
	32	33	29	30	
	31	30	32	30	2ª média: -
	30	29	32	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	34340		43,75		30,67
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	32	35	30	1ª média: 32,00
	34	32	30	30	
	30	29	36	36	2ª média: 30,67
	30	33	30	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	34760		44,28		33,63
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	33	37	34	1ª média: 33,63
	32	32	33	34	
	33	36	33	32	2ª média: -
	32	32	37	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	29620		37,73		30,64
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	27	32	33	1ª média: 30,19
	32	30	32	33	
	30	32	28	30	2ª média: 30,64
	29	28	27	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	34460		43,90		32,19
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	32	33	34	1ª média: 32,19
	33	31	32	33	
	34	30	31	30	2ª média: -
	32	31	33	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	33450		42,61		33,20
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	33	34	32	1ª média: 32,94
	33	33	29	33	
	31	33	32	35	2ª média: 33,20
	36	32	32	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	36650		46,69		34,80
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	38	32	33	1ª média: 34,44
	38	39	29	34	
	33	34	35	33	2ª média: 34,80
	33	33	36	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	31240		39,80		30,40
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	32	30	31	1ª média: 30,13
	31	28	33	29	
	29	28	33	26	2ª média: 30,40
	33	29	32	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	29700		37,83		28,27
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	29	33	30	28	1ª média: 28,56
	28	28	28	28	
	29	26	27	26	2ª média: 28,27
	31	32	26	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	37960		48,36		33,54
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	34	28	34	1ª média: 33,13
	34	36	31	33	
	35	32	32	36	2ª média: 33,54
	33	29	33	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	30920		39,39		29,64
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	33	33	28	1ª média: 29,75
	28	33	30	26	
	26	34	30	32	2ª média: 29,64
	25	28	28	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	36440		46,42		33,58
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	38	32	35	1ª média: 33,81
	35	35	31	33	
	37	34	28	34	2ª média: 33,58
	36	36	31	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	28650		36,50		28,57
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	29	32	26	30	1ª média: 28,06
	28	30	24	28	
	28	28	25	26	2ª média: 28,57
	31	27	28	29	

D.8 Resultados de esclerometria do concreto C1- 50 (7 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	46770		59,58		36,60
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	38	35	36	1ª média: 36,31
	35	38	34	32	
	36	39	37	36	2ª média: 36,60
	35	36	38	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	40730		51,89		37,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	33	41	40	1ª média: 36,75
	35	38	35	40	
	38	35	35	38	2ª média: 37,00
	38	35	36	38	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	45190		57,57		37,44
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	39	40	38	1ª média: 37,44
	38	38	38	39	
	36	36	38	38	2ª média: -
	35	35	36	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	45720		58,24		39,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	41	42	38	1ª média: 39,31
	37	43	40	37	
	37	37	41	42	2ª média: -
	38	40	40	38	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	39000		49,68		37,69
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	42	41	43	1ª média: 38,00
	38	40	40	38	
	36	36	33	37	2ª média: 37,69
	36	38	36	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	36740		46,80		37,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	36	40	40	1ª média: 36,75
	40	35	39	35	
	35	36	36	38	2ª média: 37,13
	36	38	37	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	42140		53,68		38,06
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	37	35	36	1ª média: 38,06
	41	40	41	38	
	41	38	39	38	2ª média: -
	38	36	36	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	46500		59,24		39,27
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	38	40	39	1ª média: 39,00
	35	39	41	42	
	38	38	42	40	2ª média: 39,27
	38	37	41	38	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	44010		56,06		37,63
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	36	39	38	1ª média: 37,63
	36	38	41	40	
	36	38	38	39	2ª média: -
	36	38	38	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	50660		64,54		40,60
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	42	44	44	1ª média: 40,31
	44	39	41	40	
	42	40	40	42	2ª média: 40,60
	39	42	29	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	47100		60,00		39,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	40	38	42	1ª média: 39,31
	40	40	40	38	
	40	38	38	42	2ª média: -
	37	38	41	38	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	44100		56,18		38,88
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	38	38	39	1ª média: 38,88
	40	39	39	38	
	42	40	40	38	2ª média: -
	38	38	37	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	49690		63,30		39,81
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	44	40	42	1ª média: 39,81
	38	42	41	38	
	40	38	38	40	2ª média: -
	41	39	38	38	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	43230		55,07		39,86
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	42	40	42	1ª média: 39,19
	41	38	40	42	
	39	37	39	39	2ª média: 39,86
	41	35	38	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	45390		57,82		41,14
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	45	47	45	1ª média: 40,69
	43	41	36	31	
	42	44	40	40	2ª média: 41,14
	38	42	41	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	40030		50,99		37,69
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	37	38	38	1ª média: 37,69
	38	38	39	38	
	37	40	41	37	2ª média: -
	35	38	37	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	41060		52,31		37,20
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	38	37	38	1ª média: 36,94
	38	37	37	38	
	33	35	38	39	2ª média: 37,20
	38	37	38	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	50520		64,36		40,53
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	42	44	42	1ª média: 37,69
	40	38	44	37	
	41	40	40	41	2ª média: -
	40	39	34	40	

D.9 Resultados de esclerometria do concreto C1- 50 (28 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	48750		62,10		40,85
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	45	41	38	36	1ª média: 40,50
	44	43	42	37	
	40	44	41	40	2ª média: 40,85
	41	40	40	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	44950		57,26		40,36
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	45	41	44	39	1ª média: 40,38
	40	40	39	40	
	42	40	36	43	2ª média: 40,36
	40	40	38	39	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	50220		63,97		41,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	40	40	42	1ª média: 41,00
	42	40	42	44	
	42	36	40	43	2ª média: 41,33
	42	40	40	44	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	50700		64,59		41,60
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	45	40	43	1ª média: 40,94
	40	41	44	44	
	31	43	43	45	2ª média: 41,60
	43	39	37	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	48570		61,87		40,69
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	45	44	40	1ª média: 40,19
	44	42	37	43	
	40	42	36	42	2ª média: 40,69
	39	33	39	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	39880		50,80		38,08
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	40	37	33	1ª média: 37,00
	40	40	34	31	
	37	40	35	37	2ª média: 38,08
	38	41	30	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	43370		55,25		38,81
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	37	44	40	1ª média: 37,69
	38	40	38	39	
	42	38	36	40	2ª média: -
	40	39	39	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	46550		59,30		39,54
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	44	40	42	1ª média: 37,69
	36	42	40	42	
	39	40	38	38	2ª média: -
	39	35	40	35	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
9	55300		70,45		42,73
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	46	43	39	42	1ª média: 42,13
	40	44	42	40	
	41	45	45	44	2ª média: 42,73
	43	45	42	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
10	53460		68,10		41,19
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	42	42	40	1ª média: 41,19
	44	42	42	38	
	40	43	40	40	2ª média: -
	40	40	42	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
11	42770		54,48		40,80
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	44	36	44	42	1ª média: 40,50
	38	37	44	40	
	37	44	42	38	2ª média: 40,80
	40	38	42	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
12	47180		60,10		43,57
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	46	38	45	43	1ª média: 42,88
	46	44	46	38	
	42	46	42	44	2ª média: 43,57
	42	42	42	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
13	45900		58,47		41,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	40	44	42	1ª média: 41,44
	40	38	46	40	
	40	43	42	45	2ª média: 41,13
	41	40	38	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
14	44220		56,33		39,50
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	41	36	40	1ª média: 39,50
	42	40	41	28	
	41	38	41	42	2ª média: -
	36	42	42	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
15	44550		56,75		39,54
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	38	35	43	1ª média: 39,81
	39	44	44	38	
	38	41	42	44	2ª média: 39,54
	38	36	38	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
16	50130		63,86		40,56
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	40	42	40	1ª média: 40,56
	41	38	43	40	
	37	38	43	41	2ª média: -
	39	42	43	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
17	45270		57,67		41,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	44	42	39	1ª média: 41,31
	42	41	43	41	
	40	38	42	40	2ª média: -
	43	42	45	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
18	50560		64,41		42,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	41	44	45	1ª média: 42,13
	44	41	43	44	
	44	43	44	38	2ª média: -
	42	38	40	43	

D.10 Resultados de esclerometria do concreto C2-ref (1 dia)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	29390		37,44		34,08
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	33	30	40	36	1ª média: 33,94
	34	30	32	36	
	32	35	36	33	2ª média: 34,08
	35	34	34	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	34430		43,86		35,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	38	40	36	1ª média: 35,31
	38	33	38	34	
	34	34	34	34	2ª média: 35,00
	32	33	35	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	33330		42,46		34,67
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	30	38	34	1ª média: 34,38
	33	34	38	35	
	35	33	36	34	2ª média: 34,67
	33	35	37	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	34610		44,09		37,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	33	42	40	1ª média: 36,81
	40	38	34	39	
	37	36	35	35	2ª média: 37,33
	33	40	33	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	33680		42,90		36,58
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	42	44	40	1ª média: 36,88
	36	34	35	35	
	35	40	36	35	2ª média: 36,58
	33	37	32	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	32960		41,99		34,83
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	34	34	40	1ª média: 34,75
	36	33	34	36	
	33	35	36	40	2ª média: 34,83
	28	35	30	38	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	36450		46,43		37,06
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	40	40	36	1ª média: 37,06
	39	40	40	36	
	34	36	36	36	2ª média: -
	36	36	36	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	33360		42,50		35,67
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	40	36	38	1ª média: 37,06
	36	36	34	36	
	39	36	34	34	2ª média: -
	36	34	35	33	

D.11 Resultados de esclerometria do concreto C2-ref (7 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	52160		66,45		40,75
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	40	37	42	1ª média: 40,75
	44	42	44	40	
	40	38	44	40	2ª média: -
	43	37	41	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	48730		62,08		39,53
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	41	44	40	42	1ª média: 39,81
	38	40	40	41	
	36	40	40	37	2ª média: 39,53
	37	39	39	43	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	37640		47,95		39,07
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	41	40	40	1ª média: 39,19
	37	37	40	42	
	37	38	40	42	2ª média: 39,07
	37	38	39	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	51090		65,08		41,60
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	42	44	42	1ª média: 41,94
	42	43	42	47	
	42	40	40	45	2ª média: 41,60
	42	40	41	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	47980		61,12		41,25
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	43	40	44	42	1ª média: 41,25
	42	40	42	40	
	40	38	42	44	2ª média: -
	45	40	38	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	46130		58,76		39,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	40	40	33	1ª média: 38,75
	36	40	42	42	
	37	37	40	37	2ª média: 39,13
	38	38	40	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	37490		47,76		35,54
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	40	33	38	1ª média: 36,63
	42	40	33	40	
	33	35	34	41	2ª média: 35,54
	41	34	33	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	43770		55,76		39,56
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	37	40	36	1ª média: 39,56
	40	38	41	39	
	40	42	40	41	2ª média: -
	41	38	43	39	

D.12 Resultados de esclerometria do concreto C2-ref (28 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	48900		62,29		40,63
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	43	41	38	43	1ª média: 40,63
	41	36	42	40	
	40	42	42	42	2ª média: -
	40	40	38	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	51370		65,44		41,93
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	48	46	46	45	1ª média: 42,00
	44	44	38	38	
	42	37	39	43	2ª média: 41,93
	42	39	40	41	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	48030		61,18		41,14
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	39	40	48	46	1ª média: 42,00
	42	40	41	48	
	42	42	46	40	2ª média: 41,14
	41	39	38	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	55140		70,24		44,88
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	48	44	48	43	1ª média: 44,88
	48	44	48	42	
	47	41	45	43	2ª média: -
	41	45	46	45	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	54060		68,87		42,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	42	43	44	1ª média: 42,31
	43	44	40	43	
	40	41	44	45	2ª média: -
	42	40	41	43	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	50820		64,74		44,63
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	48	48	46	42	1ª média: 44,63
	42	46	46	49	
	40	42	44	45	2ª média: -
	45	43	46	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	55620		70,85		45,63
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	42	43	44	50	1ª média: 45,63
	46	44	46	45	
	43	45	48	47	2ª média: -
	44	45	50	48	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	53440		68,08		43,38
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	45	44	44	46	1ª média: 43,48
	42	42	48	44	
	42	44	43	42	2ª média: -
	40	40	44	44	

D.13 Resultados de esclerometria do concreto C2-100 (1 dia)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	20100		25,61		32,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	31	31	35	33	1ª média: 32,13
	33	32	33	32	
	33	33	31	31	2ª média: -
	34	32	30	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	26800		34,14		32,80
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	32	34	34	1ª média: 32,50
	36	34	30	34	
	30	33	29	33	2ª média: 32,80
	28	34	30	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	24500		31,21		32,40
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	34	34	34	1ª média: 32,13
	31	31	30	35	
	29	31	31	34	2ª média: 32,40
	28	32	37	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	23800		30,32		32,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	33	32	35	1ª média: 32,06
	29	31	34	31	
	33	36	32	34	2ª média: 32,33
	32	29	30	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	24900		31,72		32,57
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	34	31	33	1ª média: 32,13
	31	31	35	34	
	30	29	37	35	2ª média: -
	30	30	34	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	25230		32,14		31,86
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	32	33	31	33	1ª média: 32,38
	30	34	36	35	
	30	30	35	30	2ª média: 31,86
	32	31	30	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	25420		32,38		32,69
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	28	30	35	1ª média: 32,31
	33	30	28	35	
	32	32	33	35	2ª média: 32,69
	30	33	33	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	18900		24,08		29,14
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	27	32	30	1ª média: 32,13
	30	33	30	28	
	30	34	30	27	2ª média: -
	28	30	29	27	

D.14 Resultados de esclerometria do concreto C2-100 (7 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	31000		39,49		33,13
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	33	37	32	1ª média: 33,38
	35	35	33	35	
	30	36	36	30	2ª média: 33,13
	31	30	31	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	34620		44,10		34,73
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	38	37	36	1ª média: 35,00
	36	39	33	36	
	35	33	36	38	2ª média: 34,73
	31	31	31	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	32860		41,86		35,08
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	35	37	40	1ª média: 35,25
	35	32	38	32	
	36	37	36	34	2ª média: 35,08
	34	28	34	36	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	32600		41,53		34,80
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	38	38	32	36	1ª média: 35,13
	35	40	37	33	
	35	33	33	34	2ª média: 34,80
	35	35	34	34	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	27760		35,36		32,85
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	31	31	30	1ª média: 33,06
	34	37	34	34	
	34	34	34	32	2ª média: 32,85
	32	32	35	28	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	30700		39,11		33,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	35	31	37	1ª média: 33,50
	35	37	34	32	
	30	34	34	30	2ª média: 33,00
	32	32	35	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	32730		41,69		34,33
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	33	35	32	1ª média: 33,75
	30	35	36	36	
	35	36	31	38	2ª média: 34,33
	30	34	30	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	28330		36,09		33,57
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	34	40	31	34	1ª média: 33,63
	36	35	35	31	
	33	31	36	35	2ª média: 33,57
	34	28	33	32	

D.15 Resultados de esclerometria do concreto C2-100 (28 dias)

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
1	37190		47,38		36,15
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	40	34	38	36	1ª média: 35,75
	36	37	37	35	
	36	42	37	33	2ª média: 36,15
	33	32	36	30	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
2	35590		45,34		36,09
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	30	42	37	38	1ª média: 34,94
	33	37	32	38	
	39	38	32	38	2ª média: 36,09
	31	35	28	31	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
3	36070		45,95		36,31
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	39	35	36	1ª média: 36,31
	34	37	36	36	
	35	40	37	38	2ª média: -
	36	37	35	33	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
4	38390		48,90		37,40
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	42	38	40	1ª média: 37,69
	38	40	39	38	
	38	35	36	38	2ª média: 37,40
	35	37	35	37	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
5	39940		50,88		39,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	35	36	38	40	1ª média: 39,00
	39	40	37	39	
	39	39	38	41	2ª média: -
	40	41	40	42	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
6	38260		48,74		37,00
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	36	37	35	38	1ª média: 36,63
	37	32	40	37	
	37	41	40	36	2ª média: 37,00
	35	35	38	32	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
7	36290		46,23		37,44
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	37	40	36	32	1ª média: 37,44
	38	37	37	37	
	38	36	40	39	2ª média: -
	36	36	40	40	

N° CP	Força de ruptura na compressão (Kgf)		Resistência à compressão (MPa)		Índice esclerom. (MPa)
8	37720		48,05		37,69
RESULTADOS NO ESCLEROMETRO	41	40	37	38	1ª média: 37,69
	38	36	38	36	
	38	37	37	40	2ª média: -
	36	38	38	35	

**APÊNDICE E – DETALHAMENTO DAS CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS DE
ESCLEROMETRIA E RESISTÊNCIA À COMRESSÃO SIMPLES**

Tabela E.1 – Resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-ref a 1 dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	45,52	32,87	0,722165
2	45,45	32,14	0,707179
3	42,66	31,07	0,728197
4	43,16	32,07	0,743095
5	45,22	32,13	0,710554
6	40,37	31,16	0,771778
7	42,38	30,90	0,72908
8	40,50	31,40	0,77537
9	32,32	26,50	0,819965
10	43,77	31,93	0,729451
11	38,57	30,56	0,792324
12	43,29	32,38	0,747922
13	41,20	31,03	0,753232
14	39,22	32,53	0,829394
15	38,73	29,82	0,769976
16	45,59	30,79	0,675238
17	42,43	27,13	0,639241
18	37,04	24,88	0,671488
Média	41,52	30,63	0,74
Desvio padrão	3,467	2,228	0,0498
Coef. de variação	0,083	0,0727	0,1105

Figura E.1 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-ref a 1 dia

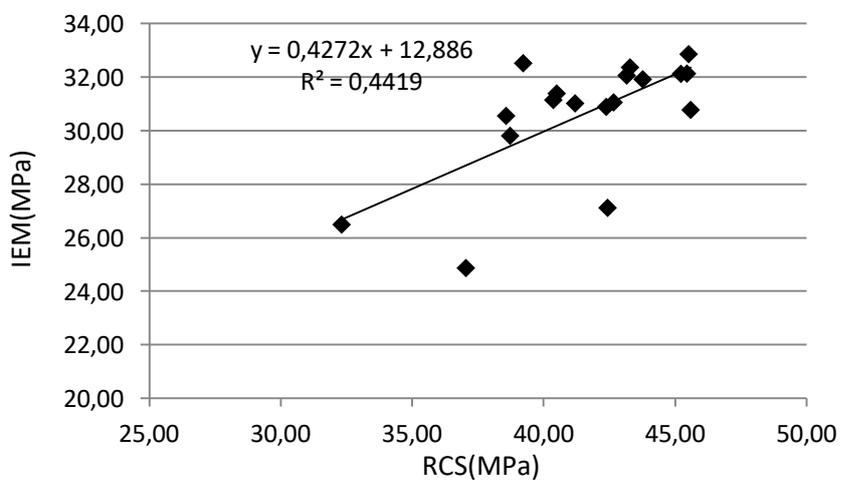


Tabela E.2 – Resistência à compressão e índice esclerométrico médio do concreto C1-30 a 1 dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	37,38	30,31	0,81102
2	34,99	28,27	0,807939
3	36,55	30,34	0,830011
4	44,18	31,57	0,714636
5	47,69	33,40	0,700294
6	35,90	29,80	0,830128
7	44,83	32,20	0,718301
8	38,01	29,73	0,782194
9	42,52	32,33	0,760385
10	42,97	33,75	0,785465
11	39,92	29,30	0,733902
12	39,17	28,27	0,721759
13	40,66	29,67	0,734708
14	32,94	28,14	0,854298
15	45,66	31,73	0,695052
16	37,30	28,36	0,760258
17	34,88	27,00	0,774105
18	35,99	29,43	0,81775
Média	39,53	30,21	0,768456
Desvio padrão	4,259	1,923	0,049327
Coef. de variação	0,10774	0,0636	0,06419

Figura E.2 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e o índice esclerométrico médio do concreto C1-30 a 1 dia

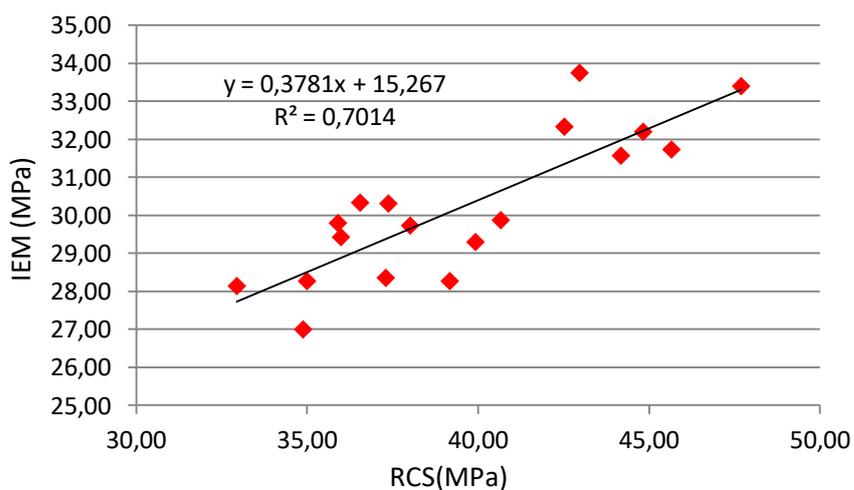


Tabela E.3 – Resistência à compressão e índice esclerométrico médio do concreto C1-50 a 1 dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	42,89	33,25	0,775208
2	38,79	30,27	0,780274
3	37,36	30,93	0,827912
4	44,03	32,38	0,73537
5	46,24	31,75	0,686605
6	37,53	30,88	0,822705
7	43,75	30,67	0,701029
8	44,28	33,63	0,759368
9	37,73	30,64	0,812108
10	43,90	32,19	0,733232
11	42,61	33,20	0,779133
12	46,69	34,80	0,745375
13	39,80	30,40	0,763892
14	37,83	28,27	0,747116
15	48,36	33,54	0,693564
16	39,39	29,64	0,752411
17	46,42	33,58	0,723461
18	36,50	28,57	0,782847
Média	41,89	31,59	0,76
Desvio padrão	3,8026	1,8534	0,04129
Coef. de variação	0,0908	0,0587	0,0545

Figura E.3 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e o índice esclerométrico médio do concreto C1-50 a 1 dia

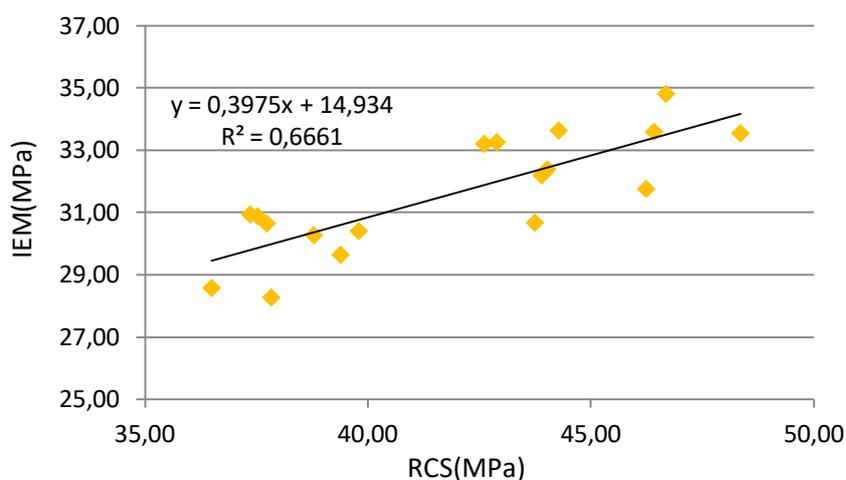


Tabela E.4 – Resistência à compressão e índice esclerométrico médio do concreto C2-ref a 1 dia

N° do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	37,44	34,08	0,910187
2	43,86	35,00	0,797996
3	42,46	34,67	0,816482
4	44,09	37,33	0,846769
5	42,90	36,58	0,85267
6	41,99	34,83	0,829617
7	46,43	37,06	0,798191
8	42,50	35,67	0,839279
Média	42,71	35,65	0,84
Desvio padrão	2,5504	1,2090	0,0363
Coef. de variação	0,0597	0,0339	0,0434

Figura E.4 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e o índice esclerométrico médio do concreto C2-ref a 1 dia

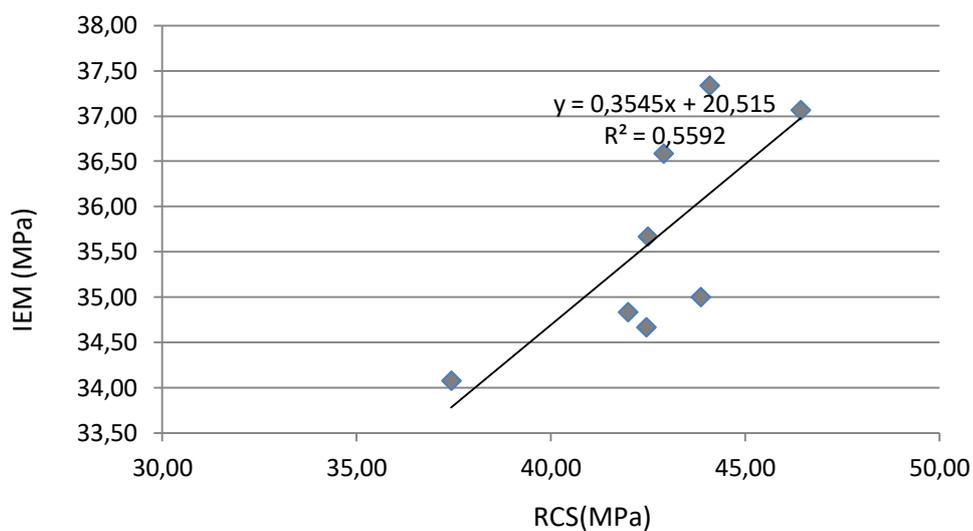


Tabela E.5 – Resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C2-100 a 1 dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	25,61	32,13	1,254633
2	34,14	32,80	0,960746
3	31,21	32,40	1,038122
4	30,32	32,33	1,066457
5	31,72	32,57	1,02685
6	32,14	31,86	0,991195
7	32,38	32,69	1,009578
8	24,08	29,14	1,210431
Média	30,20	31,99	1,07
Desvio padrão	3,5052	1,1902	0,1059
Coef. de variação	0,1161	0,0372	0,0990

Figura E.5 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C2-100 a 1 dia

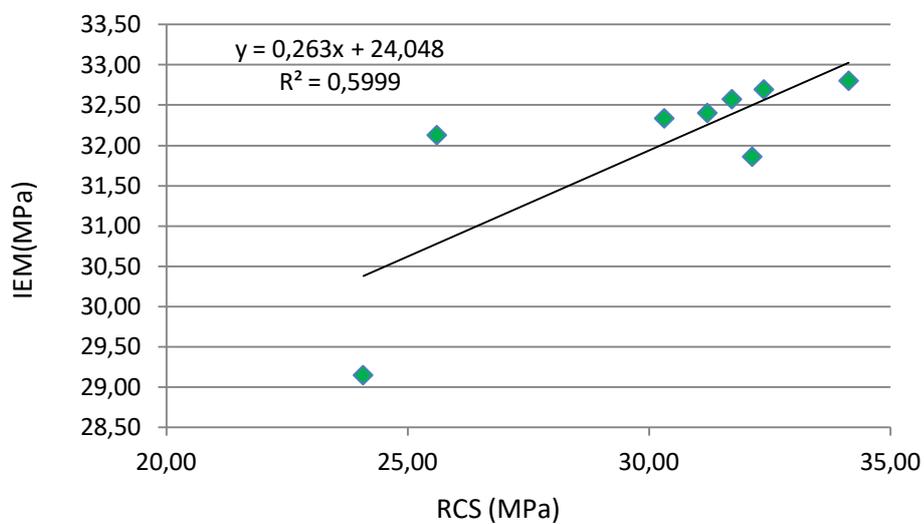


Tabela E.6 – Resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-ref ao 7º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	62,79	31,20	0,496896
2	64,57	37,00	0,572993
3	64,24	41,31	0,643076
4	56,34	32,79	0,581885
5	60,11	39,75	0,661236
6	50,14	33,27	0,663474
7	46,78	34,75	0,742885
8	65,75	41,07	0,624706
9	61,52	38,27	0,622061
10	66,36	39,60	0,596775
11	54,97	34,00	0,61854
12	49,89	34,57	0,693018
13	49,20	34,63	0,703797
14	61,02	34,15	0,559724
15	58,39	32,86	0,562671
16	52,79	34,09	0,645786
17	48,85	33,44	0,684444
18	60,57	37,19	0,613926
Média	57,46	35,77	0,627105
Desvio padrão	6,490791	3,081483	0,060307
Coef. de variação	0,112962	0,086138	0,096167

Figura E.6 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-ref ao 7º dia

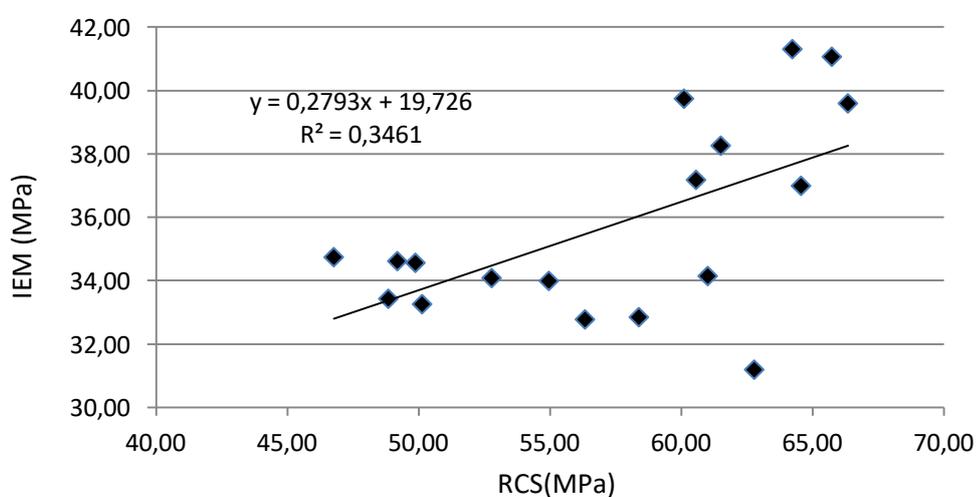


Tabela E.7 – Resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-30 ao 7º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	52,38	39,00	0,744528
2	62,98	42,53	0,675337
3	51,27	37,12	0,723892
4	55,58	35,21	0,633583
5	52,55	37,21	0,708199
6	56,15	39,00	0,694533
7	50,90	35,00	0,687563
8	50,85	36,93	0,726176
9	51,99	38,13	0,733353
10	56,03	39,94	0,712845
11	56,17	41,33	0,735919
12	50,17	36,53	0,728255
13	58,00	40,31	0,695043
14	51,29	37,69	0,734841
15	60,47	42,13	0,696611
16	60,15	42,56	0,707572
17	50,39	37,13	0,736682
18	51,24	38,73	0,755984
Média	54,36	38,69	0,712829
Desvio padrão	3,97284105	2,361621	0,029407
Coef. de variação	0,07307789	0,061034	0,041253

Figura E.7 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-30 ao 7º dia

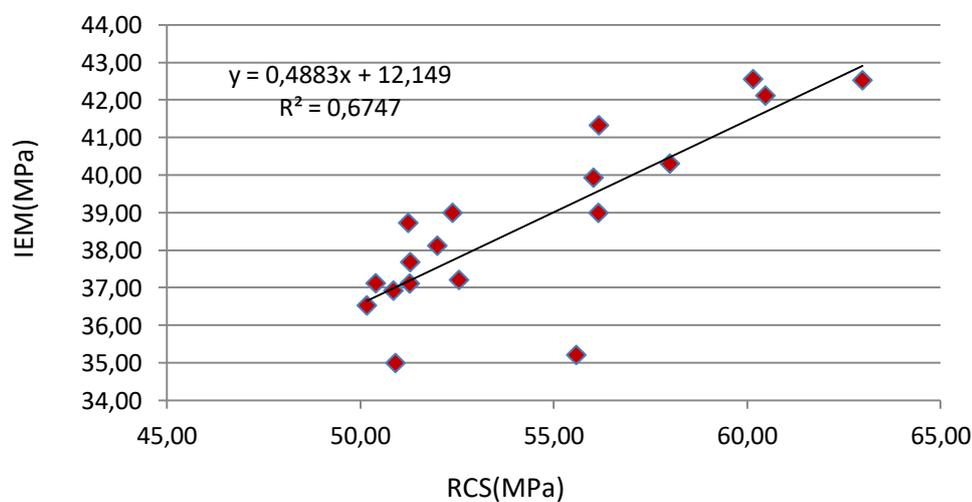


Tabela E.8 – Resistência à compressão e índice esclerométrico médio do concreto C1-50 ao 7º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	59,58	36,60	0,614304
2	51,89	37,00	0,713111
3	57,57	37,44	0,650331
4	58,24	39,31	0,674985
5	49,68	37,69	0,758679
6	46,80	37,13	0,793404
7	53,68	38,06	0,709043
8	59,24	39,27	0,662889
9	56,06	37,63	0,671112
10	64,54	40,60	0,629116
11	60,00	39,31	0,655208
12	56,18	38,88	0,691993
13	63,30	39,81	0,628956
14	55,07	39,86	0,723753
15	57,82	41,14	0,711548
16	50,99	37,69	0,739063
17	52,31	37,20	0,711203
18	64,36	40,53	0,629823
Média	56,52	38,62	0,69
Desvio padrão	5,015709	1,407995	0,049413
Coef. de variação	0,088747	0,036458	0,071912

Figura E.8 – Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-50 ao 7º dia

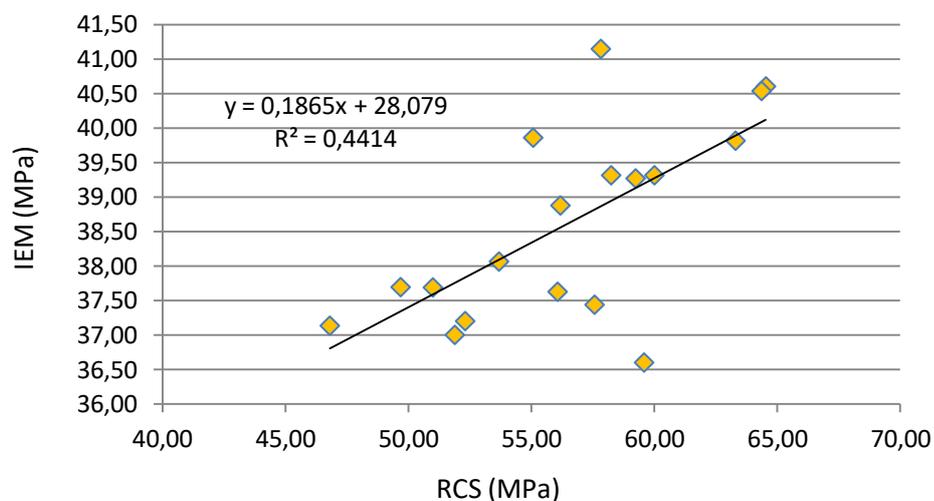


Tabela E.9 – Resistência à compressão e índice esclerométrico médio do concreto C2-ref ao 7º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	66,45	40,75	0,613281
2	62,08	39,53	0,636849
3	47,95	39,07	0,814754
4	65,08	41,60	0,639186
5	61,12	41,25	0,674891
6	58,76	39,13	0,665937
7	47,76	35,54	0,744137
8	55,76	39,56	0,70954
Média	58,12	39,55	0,69
Desvio padrão	7,1641	1,8910	0,0665
Coef. de variação	0,1233	0,0478	0,0967

Figura E.9 – Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C2-ref ao 7º dia

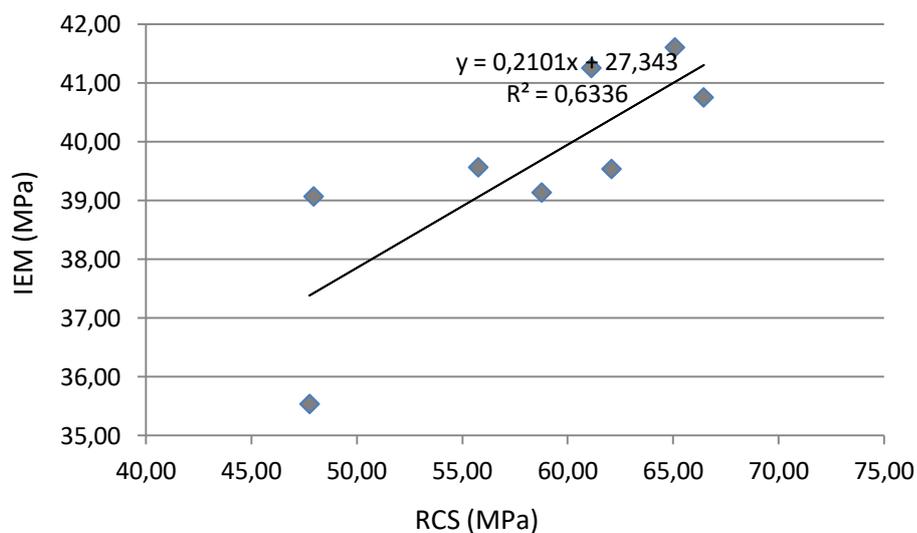


Tabela E.10 – Resistência à compressão e índice esclerométrico médio do concreto C2-100 ao 7º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	39,49	33,13	0,839022
2	44,10	34,73	0,78757
3	41,86	35,08	0,837961
4	41,53	34,80	0,837975
5	35,36	32,85	0,928827
6	39,11	33,00	0,843811
7	41,69	34,33	0,823455
8	36,09	33,57	0,930235
Média	39,90	33,94	0,85
Desvio padrão	3,0064	0,9010	0,0501
Coef. de variação	0,0753	0,0265	0,0587

Figura E.10 – Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C2-100 ao 7º dia

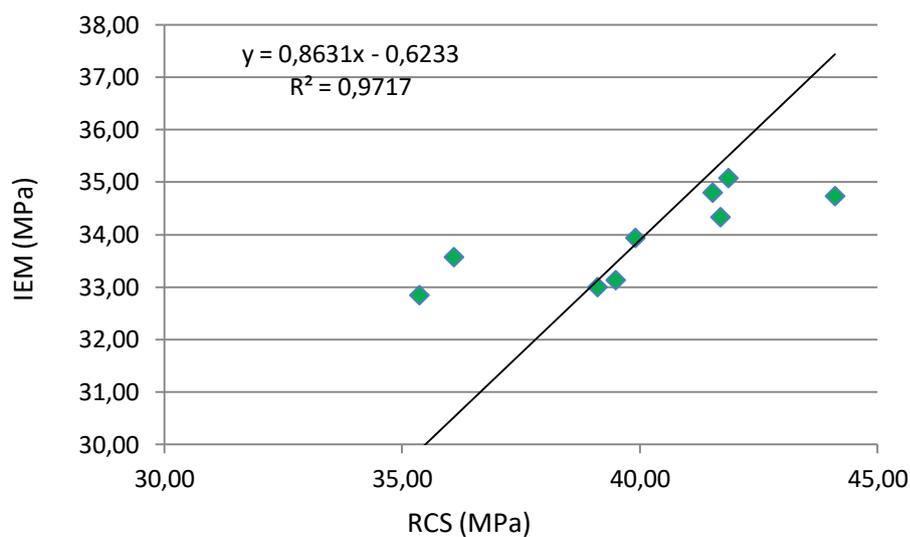
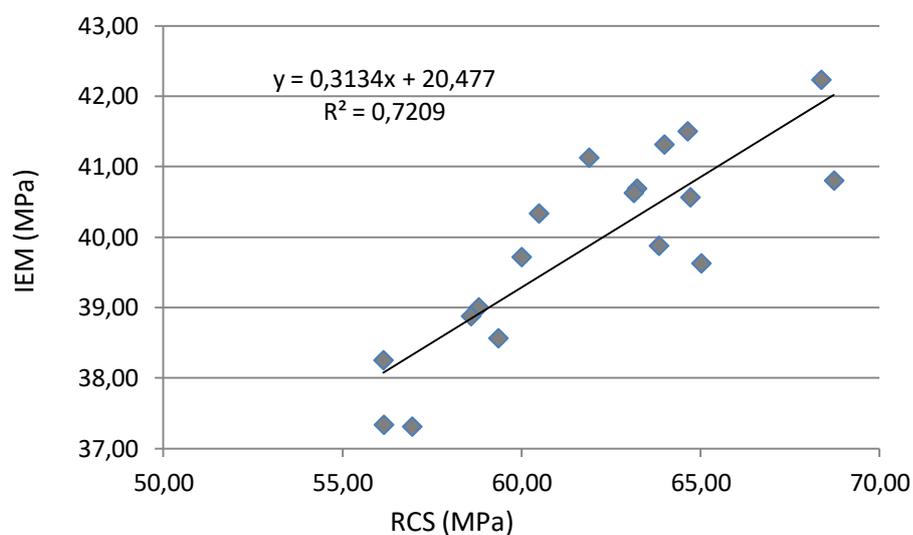


Tabela E.11 – Resistência à compressão e índice esclerométrico médio do concreto C1-ref ao 28° dia

N° do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	63,83	39,88	0,624663
2	60,00	39,71	0,661905
3	63,99	41,31	0,645636
4	58,80	39,00	0,663237
5	56,14	38,25	0,681331
6	58,59	38,88	0,663555
7	68,73	40,80	0,593661
8	59,35	38,56	0,649744
9	65,02	39,63	0,609436
10	61,89	41,13	0,664535
11	60,48	40,33	0,666842
12	56,15	37,33	0,664852
13	63,22	40,69	0,643556
14	56,94	37,31	0,65518
15	68,37	42,23	0,617685
16	64,71	40,56	0,626802
17	63,13	40,63	0,643475
18	64,64	41,50	0,642048
Média	61,89	39,87	0,65
Desvio padrão	3,822734	1,411059	0,023089
Coef. de variação	0,061768	0,035389	0,035772

Figura E.11 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-ref ao 28° dia



Quadro E.12 – Resistência à compressão e índice esclerométrico médio do concreto C1-30 ao 28º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	55,10	37,71	0,684525
2	58,80	40,86	0,694819
3	53,80	39,20	0,728676
4	68,43	41,47	0,605944
5	59,49	41,36	0,69519
6	63,75	41,33	0,648415
7	49,59	37,44	0,754905
8	52,32	36,40	0,695739
9	64,99	40,94	0,629869
10	53,50	37,67	0,704008
11	57,89	40,25	0,69534
12	63,45	41,00	0,646155
13	53,34	37,36	0,700391
14	53,77	35,40	0,658351
15	61,44	39,82	0,648088
16	55,18	38,67	0,700677
17	52,23	36,50	0,698841
18	54,36	39,44	0,725532
Média	57,30	39,04	0,68
Desvio padrão	5,257178	1,960913	0,037646
Coef. de variação	0,091746	0,050223	0,055023

Figura E.12 – Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-30 ao 28º dias

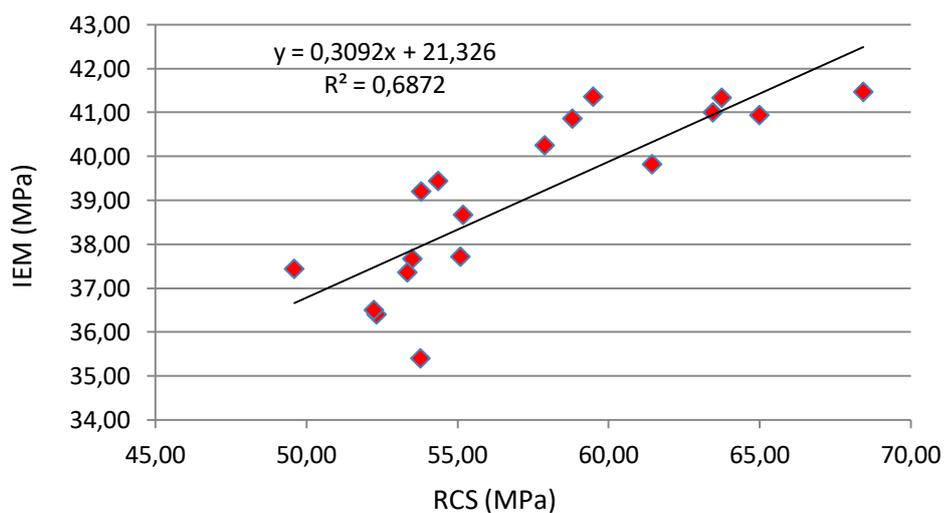


Tabela E.13 – Resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-50 ao 28º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	62,10	40,85	0,657728
2	57,26	40,36	0,704791
3	63,97	41,33	0,646091
4	64,59	41,60	0,644103
5	61,87	40,69	0,657679
6	50,80	38,08	0,749634
7	55,25	38,81	0,702509
8	59,30	39,54	0,66676
9	70,45	42,73	0,606612
10	68,10	41,19	0,604792
11	54,48	40,80	0,748843
12	60,10	43,57	0,724959
13	58,47	41,13	0,703479
14	56,33	39,50	0,70121
15	56,75	39,54	0,696693
16	63,86	40,56	0,63518
17	57,67	41,31	0,716375
18	64,41	42,13	0,654037
Média	60,32	40,76	0,68
Desvio padrão	5,025628	1,351842	0,043823
Coef. de variação	0,083315	0,033164	0,064543

Figura E.13 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C1-50 ao 28º dia

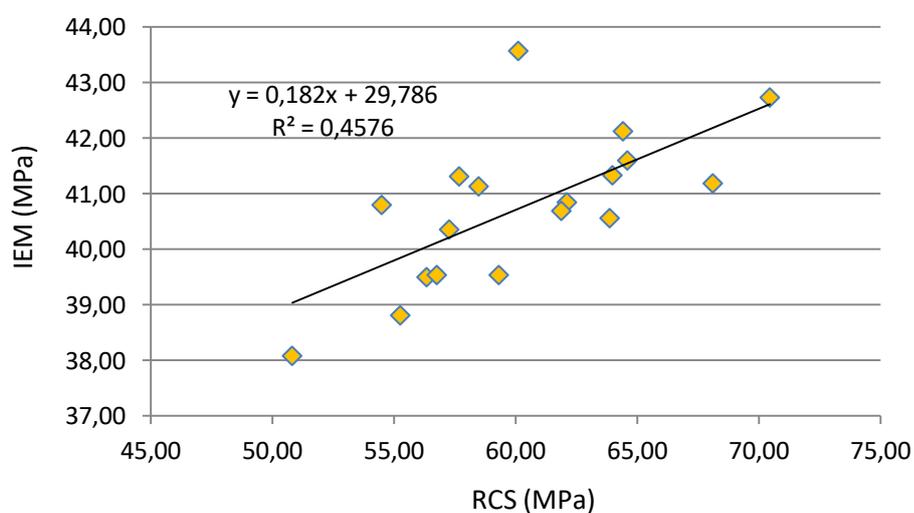


Tabela E.14 – Resistência à compressão simples e o índice esclerométrico médio do concreto C2-ref ao 28º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	62,29	40,63	0,65216
2	65,44	41,93	0,640723
3	61,18	41,14	0,672437
4	70,24	44,88	0,638862
5	68,87	42,31	0,614416
6	64,74	44,63	0,689308
7	70,85	45,63	0,643934
8	68,08	43,38	0,637151
Média	66,46	43,06	0,65
Desvio padrão	3,6096	1,8464	0,0230
Coef. de variação	0,0543	0,0429	0,0355

Figura E.14 - Regressão linear entre resistência à compressão simples e o índice esclerométrico médio do concreto C2-ref ao 28º dia

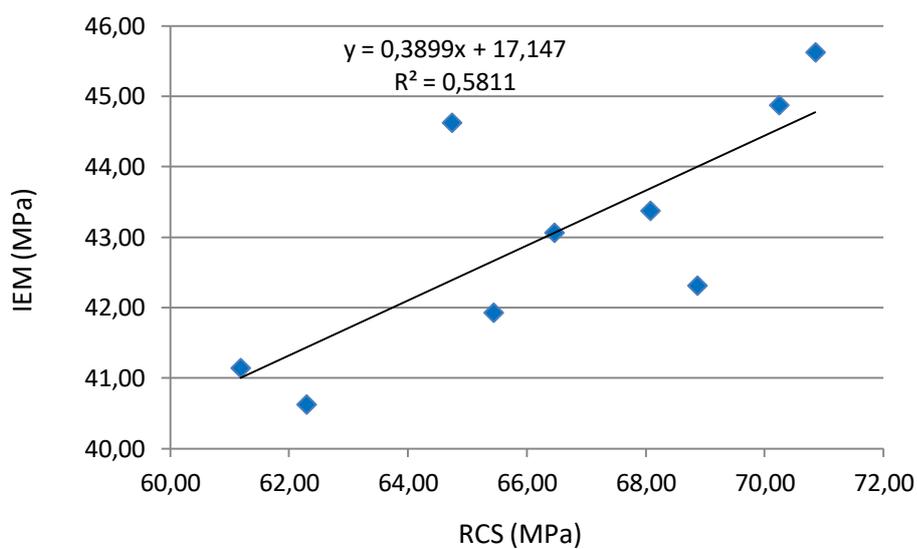
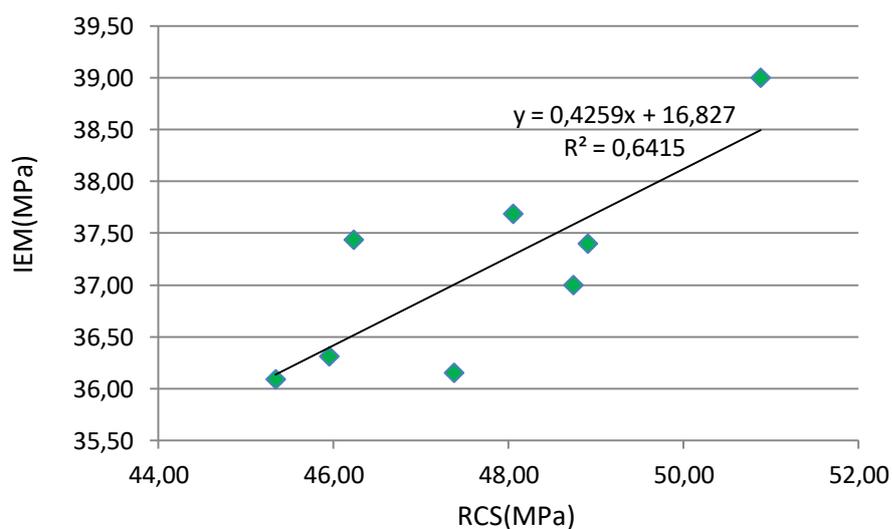


Tabela E.15 – Resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C2-100 ao 28º dia

Nº do corpo de prova	Resistência à compressão simples – RCS (MPa)	Índice esclerométrico médio – IEM (MPa)	Relação IEM/RCS
1	47,38	36,15	0,763129
2	45,34	36,09	0,796048
3	45,95	36,31	0,790278
4	48,90	37,40	0,764756
5	50,88	39,00	0,766525
6	48,74	37,00	0,759148
7	46,23	37,44	0,809822
8	48,05	37,69	0,784324
Média	47,68	37,14	0,780000
Desvio padrão	1,83893	0,97781	0,01852
Coef. de variação	0,03857	0,02633	0,02376

Figura E.15 - Correlação entre resistência à compressão simples e índice esclerométrico médio do concreto C2-100 aos 28 dias



**APÊNDICE F – ANÁLISES ESTATÍSTICAS COM DADOS DE RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO SIMPLES: ANOVA E TESTE T PARA MÉDIAS**

Tabela F.1 – Análise de semelhança estatística entre as amostras no ensaio de resistência à compressão simples

Idade de cura (dias)	Referência (1)x(2)	Análise de variância (ANOVA)			Teste T para médias			Conclusão final
		F crítico	F calculado	Conclusão	T crítico	T calculado	Conclusão	
1	C1-ref x C1-30	4,13	2,37	Variâncias iguais	2,11	0,14	Médias iguais	Amostras iguais
	C1-ref x C1-50	4,13	0,09	Variâncias iguais	2,11	0,72	Médias iguais	Amostras iguais
	C1-30 x C1-50	4,13	3,08	Variâncias iguais	2,11	0,02	Médias iguais	Amostras iguais
7	C1-ref x C1-30	4,13	2,97	Variâncias iguais	2,11	0,10	Médias iguais	Amostras iguais
	C1-ref x C1-50	4,13	0,23	Variâncias iguais	2,11	0,56	Médias iguais	Amostras iguais
	C1-30 x C1-50	4,13	2,03	Variâncias iguais	2,11	0,19	Médias iguais	Amostras iguais
28	C1-ref x C1-30	4,13	8,96	Variâncias diferentes	-	-	-	Amostras diferentes
	C1-ref x C1-50	4,13	1,10	Variâncias iguais	2,11	0,27	Médias iguais	Amostras iguais
	C1-30 x C1-50	4,13	3,10	Variâncias iguais	2,11	0,07	Médias iguais	Amostras iguais
105	C1-ref x C1-30	4,13	4,46	Variâncias diferentes	-	-	-	Amostras diferentes
	C1-ref x C1-50	4,13	0,01	Variâncias iguais	2,11	0,91	Médias iguais	Amostras iguais
	C1-30 x C1-50	4,13	3,81	Variâncias iguais	2,11	0,02	Médias iguais	Amostras iguais
1	C2-ref x C2-100	4,60	66,62	Variâncias diferentes	-	-	-	Amostras diferentes
7	C2-ref x C2-100	4,60	43,97	Variâncias diferentes	-	-	-	Amostras diferentes
28	C2-ref x C2-100	4,60	171,90	Variâncias diferentes	-	-	-	Amostras diferentes
105	C2-ref x C2-100	4,60	218,73	Variâncias diferentes	-	-	-	Amostras diferentes

APÊNDICE G – DADOS POR CORPO DE PROVA DO ENSAIO DE ABSORÇÃO

Tabela G.1 – Detalhamento dos dados de absorção do concreto C1-ref

Número do corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Densidade seca (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Índice de vazios	Absorção ao longo do tempo (%)				
							4 horas	8 horas	24 horas	48 horas	72 horas (Absorção final)
1	3645,6	3755,60	2,321	2,393	2,465	0,072	0,56	1,59	2,58	2,72	3,02
2	3616,8	3712,30	2,303	2,399	2,462	0,063	0,65	1,78	2,31	2,51	2,64
3	3610,4	3722,30	2,298	2,359	2,432	0,073	0,93	1,94	2,89	2,99	3,10
4	3691,0	3793,00	2,350	2,376	2,441	0,066	0,57	1,54	2,44	2,56	2,76
5	3583,4	3688,80	2,281	2,389	2,459	0,070	0,66	1,74	2,68	2,85	2,94
6	3627,6	3744,80	2,309	2,371	2,448	0,077	0,71	1,76	2,62	2,92	3,23
7	3638,0	3745,60	2,316	2,338	2,408	0,069	0,75	1,98	2,38	2,71	2,96
8	3623,2	3711,30	2,307	2,378	2,436	0,058	0,59	1,68	2,15	2,33	2,43
Média	3629,5	3734,21	2,311	2,375	2,444	0,069	0,68	1,75	2,50	2,70	2,89
Desv. pad.	31,1868	32,4357	0,019854	0,01962	0,019052	0,006007	0,12	0,15	0,23	0,22	0,26
Coef. de variação (%)	0,85	0,87	0,86	0,83	0,78	8,77	18,27	8,73	9,24	8,24	9,00

Tabela G.2 – Detalhamento dos dados de absorção do concreto C1-30

Número do corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Densidade seca (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Índice de vazios	Absorção ao longo do tempo (%)				
							4 horas	8 horas	24 horas	48 horas	72 horas (Absorção final)
1	3626,9	3757,8	2,309	2,323	2,407	0,084	1,07	2,08	3,07	3,30	3,61
2	3588,4	3716,7	2,284	2,310	2,392	0,083	1,07	2,06	3,12	3,37	3,57
3	3571,4	3725,5	2,274	2,279	2,377	0,098	1,16	2,31	3,88	4,12	4,31
4	3647,6	3772,4	2,322	2,337	2,417	0,080	0,95	2,00	3,04	3,24	3,42
5	3664,6	3778,9	2,333	2,314	2,386	0,072	0,97	2,11	2,62	2,84	3,12
6	3599,5	3737,5	2,292	2,311	2,400	0,089	0,93	2,26	3,31	3,57	3,83
7	3607,3	3736,9	2,296	2,315	2,398	0,083	1,12	2,56	3,26	3,44	3,59
8	3614,5	3721,7	2,301	2,310	2,378	0,069	0,40	1,84	2,68	2,85	2,97
Média	3615,0	3743,4	2,301	2,312	2,395	0,082	0,96	2,15	3,12	3,34	3,55
Desv. pad.	30,6427	23,5749	0,0195	0,0163	0,0138	0,0092	0,24	0,22	0,39	0,41	0,42
Coef. de variação (%)	0,85	0,63	0,85	0,71	0,58	11,25	25,26	10,27	12,57	12,23	11,71

Tabela G.3 – Detalhamento dos dados de absorção do concreto C1-50

Número do corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Densidade seca (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Índice de vazios	Absorção ao longo do tempo (%)				
							4 horas	8 horas	24 horas	48 horas	72 horas (Absorção final)
1	3621,5	3758,1	2,306	2,284	2,370	0,086	1,27	2,38	3,43	3,59	3,77
2	3565,1	3711,9	2,270	2,258	2,351	0,093	1,42	2,69	3,63	3,97	4,12
3	3586,5	3725,5	2,283	2,300	2,389	0,089	1,32	2,53	3,56	3,75	3,88
4	3608,6	3763,1	2,297	2,280	2,377	0,098	1,46	2,59	3,93	4,08	4,28
5	3568,3	3712,8	2,272	2,238	2,329	0,091	1,48	2,65	3,67	3,90	4,05
6	3609,9	3764,1	2,298	2,269	2,366	0,097	1,39	2,59	3,90	4,06	4,27
7	3564,4	3710,2	2,269	2,256	2,349	0,092	1,46	2,79	3,76	3,94	4,09
8	3615,9	3766,5	2,302	2,292	2,387	0,095	1,19	2,57	3,78	3,99	4,16
Média	3592,5	3739,0	2,287	2,272	2,365	0,093	1,37	2,60	3,71	3,91	4,08
Desv. pad.	24,239	26,09264	0,0154	0,020695	0,02086	0,003958	0,10	0,12	0,17	0,16	0,18
Coef. de variação (%)	0,675	0,697846	0,6747	0,910839	0,882118	4,271877	7,09	4,26	4,28	3,93	4,11

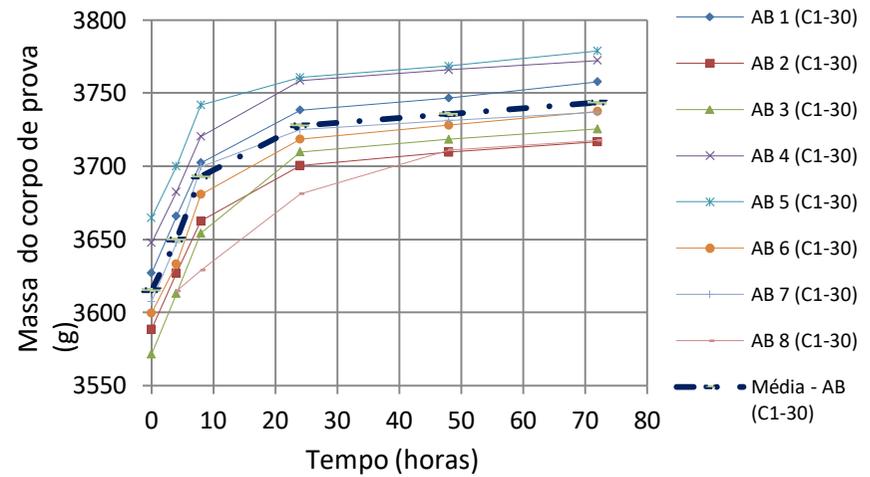
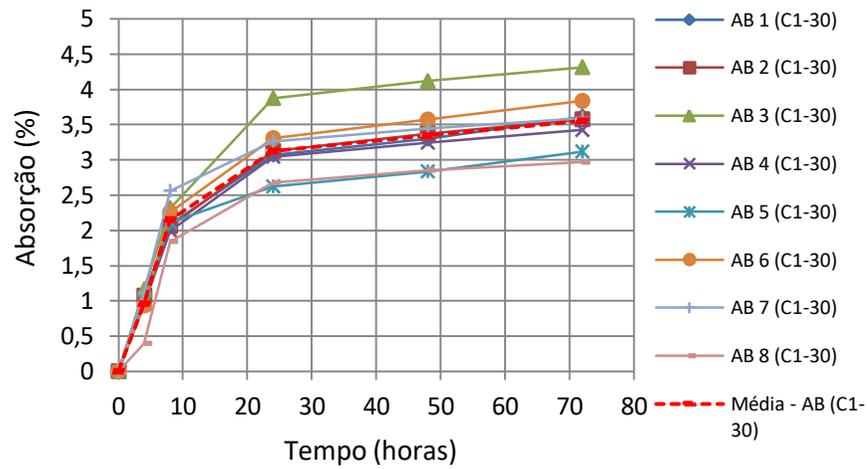
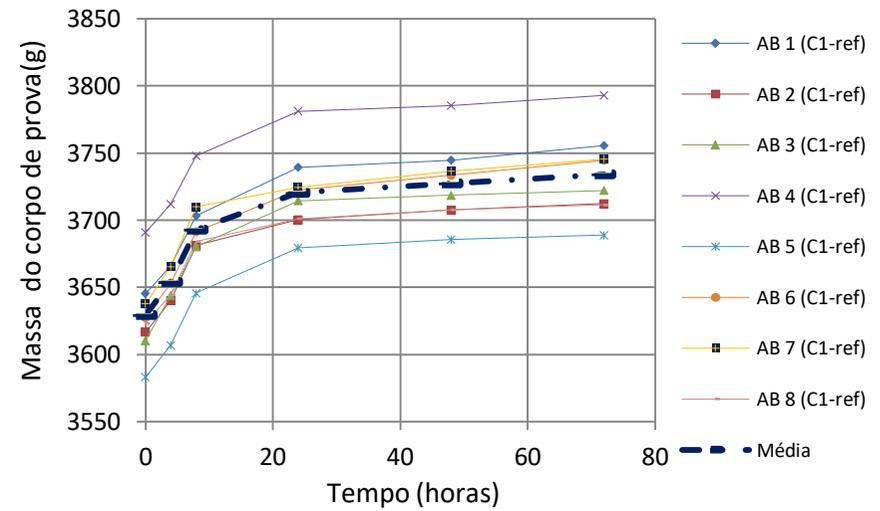
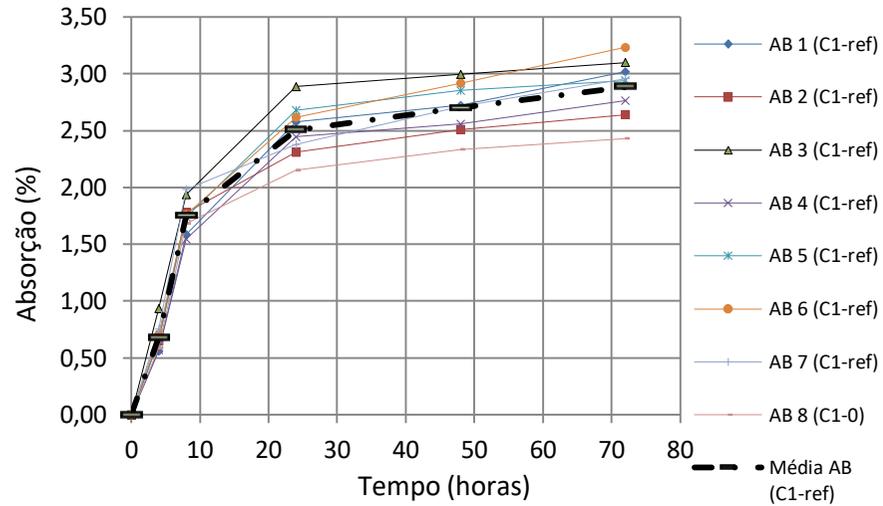
Tabela G.4 – Detalhamento dos dados de absorção do concreto C2-ref

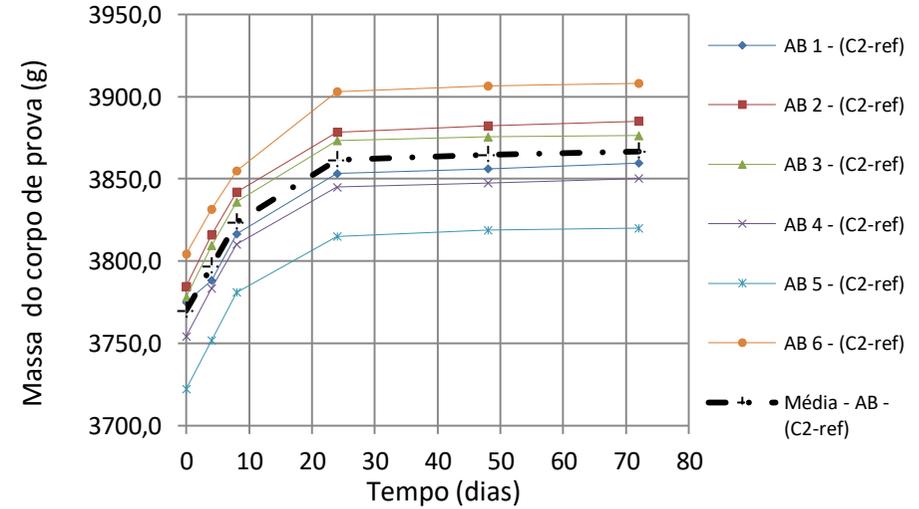
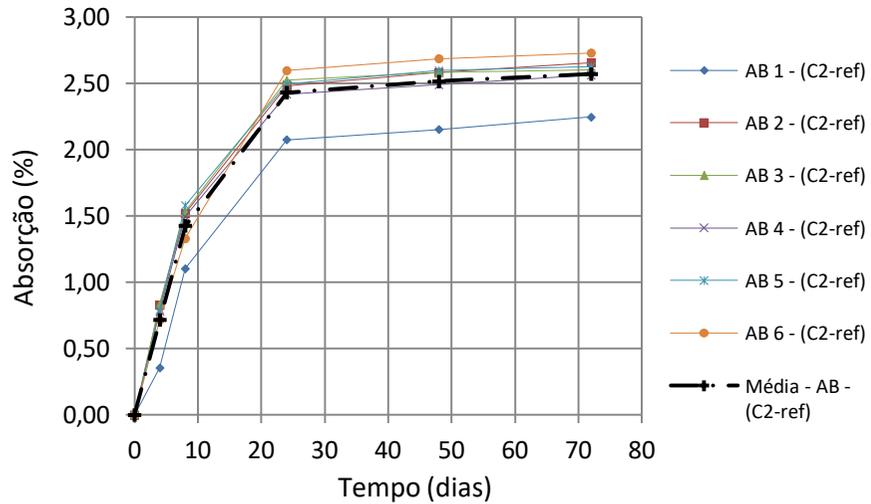
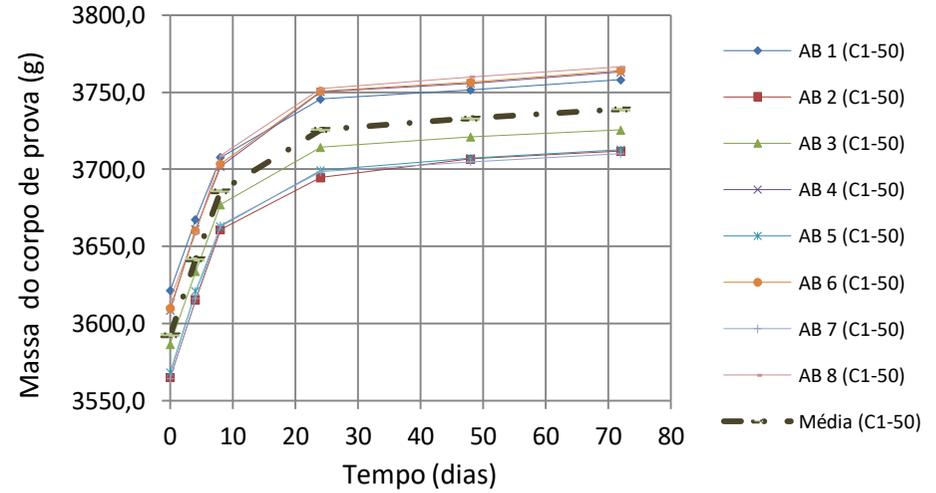
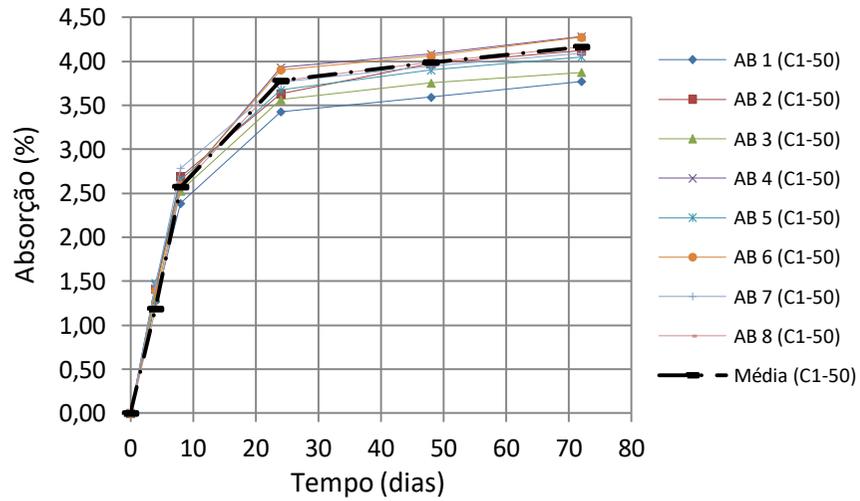
Número do corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Densidade seca (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Índice de vazios	Absorção ao longo do tempo (%)				
							4 horas	8 horas	24 horas	48 horas	72 horas (Absorção final)
1	3775,0	3859,7	2,403	2,375	2,428	0,053	0,35	1,10	2,07	2,15	2,24
2	3784,7	3885,2	2,409	2,372	2,435	0,063	0,83	1,52	2,48	2,58	2,66
3	3778,1	3876,4	2,405	2,380	2,442	0,062	0,83	1,53	2,52	2,58	2,60
4	3754,2	3850,4	2,390	2,366	2,427	0,061	0,78	1,49	2,42	2,49	2,56
5	3722,3	3820,1	2,370	2,365	2,427	0,062	0,79	1,58	2,49	2,60	2,63
6	3804,4	3908,2	2,422	2,370	2,435	0,065	0,71	1,33	2,60	2,69	2,73
Média	3769,8	3866,7	2,400	2,371	2,432	0,061	0,72	1,43	2,43	2,51	2,57
Desv. pad.	28,3362	30,4857	0,0180	0,0056	0,0060	0,0040	0,18	0,18	0,18	0,19	0,17
Coef. de variação (%)	0,751667	0,788425	0,75	0,23	0,25	6,52	23,23	11,53	6,90	6,83	6,00

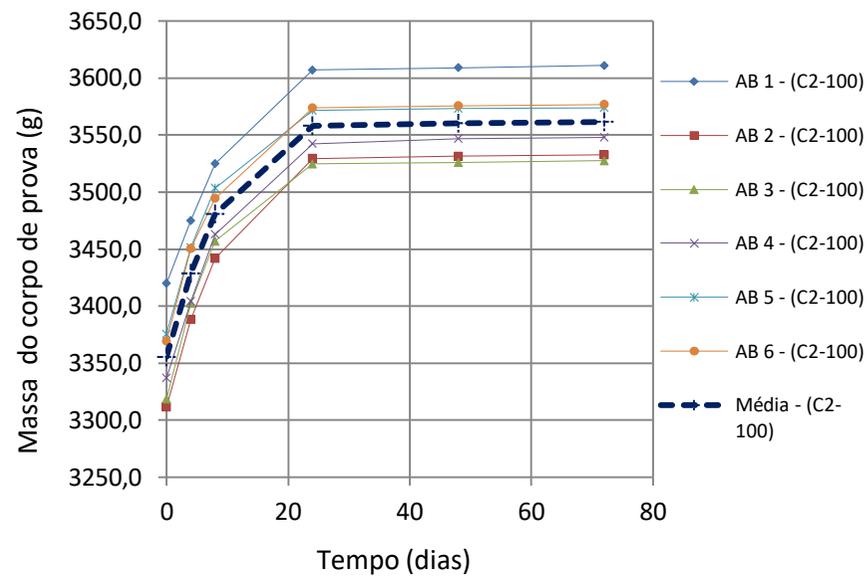
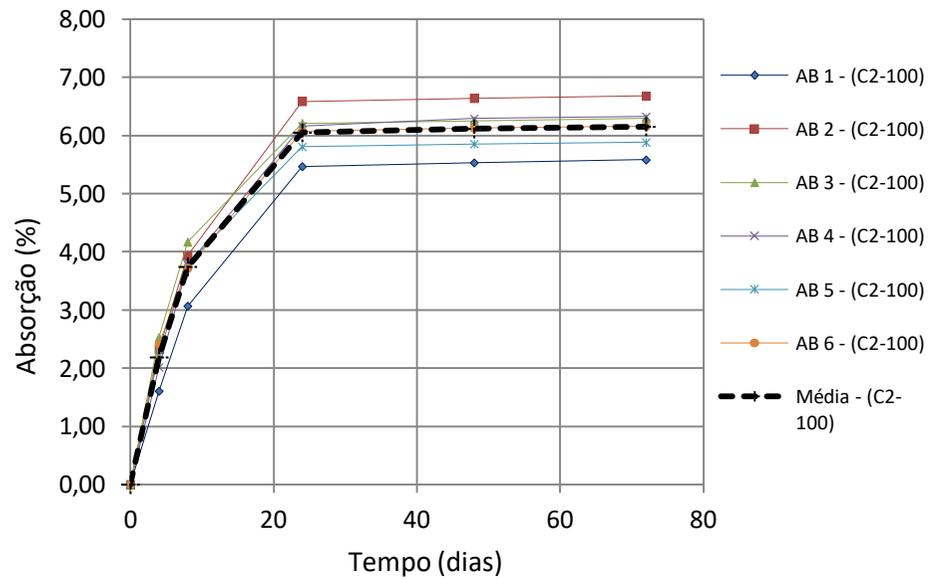
Tabela G.5 – Detalhamento dos dados de absorção do concreto C2-100

Número do corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Densidade seca (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Índice de vazios	Absorção ao longo do tempo (%)				
							4 horas	8 horas	24 horas	48 horas	72 horas (Absorção final)
1	3420,0	3611,0	2,177	2,122	2,240	0,118	1,61	3,07	5,47	5,53	5,58
2	3311,5	3532,7	2,108	2,065	2,203	0,138	2,32	3,94	6,59	6,64	6,68
3	3318,5	3527,4	2,113	2,082	2,213	0,131	2,53	4,17	6,21	6,25	6,30
4	3337,0	3548,1	2,124	2,074	2,205	0,131	2,02	3,78	6,16	6,29	6,33
5	3375,6	3574,1	2,149	2,092	2,215	0,123	2,25	3,79	5,81	5,85	5,88
6	3369,4	3577,0	2,145	2,094	2,223	0,129	2,41	3,72	6,07	6,13	6,16
Média	3355,3	3561,7	2,136	2,088	2,216	0,128	2,19	3,74	6,05	6,12	6,15
Desv. pad.	41,01332	31,67287	0,02611	0,019752	0,013649	0,006846	0,33	0,37	0,38	0,38	0,38
Coef. de variação (%)	1,22	0,89	1,22	0,95	0,62	5,33	15,22	9,84	6,29	6,27	6,20

Figura G.1 – Gráficos da evolução da absorção e massa ao longo do tempo







**APÊNDICE H – DADOS POR CORPO DE PROVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE
ELASTICIDADE DINÂMICO**

Tabela H.1 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C1-ref

Número do corpo de prova	Peso (kg)	Volume (m ³)	Densidade (kg/m ³)	Tempo de propagação da onda (μs)	Velocidade (km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
1	3,622	0,00154	2354,0	44,5	4,40	41,10
2	3,634	0,00151	2411,3	46,6	4,12	36,84
3	3,628	0,00148	2445,5	48,3	3,91	33,70
4	3,638	0,00152	2389,1	45,9	4,23	38,41
5	3,671	0,00155	2361,8	46,7	4,24	38,21
6	3,628	0,00155	2334,4	42,1	4,70	46,47
7	3,668	0,00152	2421,0	42,5	4,54	44,93
8	3,632	0,00151	2410,0	44,9	4,28	39,66
9	3,641	0,00152	2403,4	45,9	4,20	38,24
10	3,629	0,00150	2420,2	41,5	4,60	46,14
11	3,631	0,00150	2422,0	43,7	4,37	41,64
12	3,635	0,00152	2387,2	45,8	4,24	38,55
13	3,629	0,00153	2370,5	43,0	4,53	43,87
14	3,631	0,00152	2384,5	47,0	4,13	36,56
15	3,629	0,00155	2346,5	46,2	4,26	38,40
16	3,633	0,00149	2436,1	42,0	4,52	44,87
17	3,712	0,00152	2450,3	44,1	4,38	42,24
18	3,579	0,00150	2386,8	47,0	4,06	35,48
Média	3,637	0,00152	2396,36	44,87	4,32	40,30
Desvio padrão	0,026	0,00002	33,91	2,04	0,21	3,80
Coef. de var. (%)	0,73	1,36	1,42	4,54	4,78	9,43

Tabela H.2 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C1-30

Número do corpo de prova	Peso (kg)	Volume (m ³)	Densidade (kg/m ³)	Tempo de propagação da onda (μs)	Velocidade (km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
1	3,598	0,00150	2399,7	44,5	4,29	39,79
2	3,601	0,00153	2352,5	45,5	4,29	38,89
3	3,601	0,00151	2389,3	42,7	4,50	43,48
4	3,598	0,00152	2362,5	44,6	4,35	40,23
5	3,646	0,00152	2393,9	47,0	4,13	36,71
6	3,567	0,00150	2379,1	44,2	4,32	39,98
7	3,666	0,00153	2394,7	41,8	4,67	46,90
8	3,511	0,00151	2329,6	42,6	4,51	42,59
9	3,598	0,00149	2412,4	47,4	4,01	34,89
10	3,602	0,00155	2317,6	46,6	4,25	37,66
11	3,621	0,00153	2365,5	45,0	4,33	39,98
12	3,572	0,00152	2357,3	47,1	4,10	35,62
13	3,581	0,00152	2363,8	45,2	4,27	38,79
14	3,591	0,00151	2382,6	46,8	4,10	36,09
15	3,613	0,00155	2336,4	45,6	4,32	39,25
16	3,635	0,00153	2374,3	42,9	4,55	44,15
17	3,561	0,00152	2350,5	46,4	4,16	36,60
18	3,642	0,00150	2429,1	45,6	4,19	38,36
Média	3,600	0,00119	2371,72	45,08	4,30	39,44
Desvio padrão	0,036	0,00002	29,12	1,71	0,17	3,19
Coef. de var. (%)	0,99	1,44	1,23	3,79	4,03	8,08

Tabela H.3 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C1-50

Número do corpo de prova	Peso (kg)	Volume (m ³)	Densidade (kg/m ³)	Tempo de propagação da onda (µs)	Velocidade (km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
1	3,591	0,00150	2395,0	44,2	4,32	40,25
2	3,598	0,00151	2387,2	45,1	4,26	38,94
3	3,527	0,00149	2364,7	42,5	4,47	42,54
4	3,612	0,00151	2396,5	46,7	4,11	36,46
5	3,555	0,00155	2298,8	49,1	4,01	33,31
6	3,578	0,00153	2337,4	41,2	4,73	47,13
7	3,608	0,00149	2419,0	41,1	4,62	46,53
8	3,610	0,00152	2382,8	44,8	4,31	39,80
9	3,612	0,00153	2359,6	45,6	4,28	38,84
10	3,587	0,00150	2392,4	43,4	4,40	41,70
11	3,511	0,00149	2354,0	45,6	4,17	36,78
12	3,497	0,00152	2308,2	48,3	4,00	33,17
13	3,590	0,00155	2321,4	46,6	4,23	37,34
14	3,612	0,00154	2347,6	43,7	4,49	42,50
15	3,601	0,00152	2364,6	43,0	4,51	43,32
16	3,607	0,00152	2368,5	45,6	4,25	38,58
17	3,595	0,00152	2360,6	52,0	3,73	29,57
18	3,587	0,00149	2405,0	45,6	4,17	37,58
Média	3,582	0,00152	2364,63	45,23	4,28	39,13
Desvio padrão	0,036	0,00002	33,18	2,74	0,24	4,52
Coef. de var. (%)	1,000	1,24403	1,40	6,06	5,62	11,55

Tabela H.4 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C2-ref

Número do corpo de prova	Peso (kg)	Volume (m³)	Densidade (kg/m³)	Tempo de propagação da onda (µs)	Velocidade (km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
1	3,741	0,001531	2443,9	47,1	4,14	37,70
2	3,778	0,001523	2480,8	45,5	4,26	40,59
3	3,754	0,001531	2452,4	44,0	4,43	43,35
4	3,712	0,001531	2425,0	42,9	4,55	45,09
5	3,768	0,001546	2436,5	45,8	4,30	40,57
6	3,761	0,001523	2469,6	42,5	4,56	46,31
7	3,708	0,001531	2422,3	44,1	4,42	42,63
8	3,755	0,001523	2465,7	44,8	4,33	41,61
Média	3,747	0,00153	2449,53	44,59	4,37	42,23
Desvio padrão	0,025	0,00001	21,36	1,53	0,14	2,74
Coef. de var. (%)	0,68	0,51	0,87	3,44	3,29	6,49

Tabela H.5 – Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico do concreto C2-100

Número do corpo de prova	Peso (kg)	Volume (m³)	Densidade (kg/m³)	Tempo de propagação da onda (μs)	Velocidade (km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
1	3,351	0,00153	2189,1	51,3	3,80	28,47
2	3,359	0,00153	2194,3	48,5	4,02	31,93
3	3,364	0,00154	2186,4	46,2	4,24	35,42
4	3,381	0,00148	2291,0	45,0	4,18	35,99
5	3,391	0,00152	2226,7	48,0	4,04	32,74
6	3,354	0,00152	2202,4	47,1	4,12	33,63
7	3,321	0,00155	2147,5	47,2	4,17	33,67
8	3,333	0,00153	2177,4	50,2	3,88	29,57
Média	3,357	0,00152	2201,84	47,94	4,06	32,67
Desvio padrão	0,023	0,00002	42,37	2,06	0,15	2,63
Coef. de var. (%)	0,685	1,39635	1,92	4,29	3,76	8,04

**APÊNDICE I – DADOS POR CORPO DE PROVA DO ENSAIO DE MÓDULO DE
ELASTICIDADE ESTÁTICO**

Tabela I.1 – Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C1-ref

Número do corpo de prova	Carga de ruptura na compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Deformação em 30% da ruptura prevista (μm)	Deformação em 0,5 MPa (μm)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
1	737.443	93,89	-	-	-
2	715.576	91,11	-	-	-
3	594.659	75,71	716,2	73,5	42,3
4	594.874	75,74	704,6	57,4	42,0
5	593.867	75,61	708,6	55,6	41,7
Média	647.300	82,41	709,8	62,15	42,03
Desvio padrão	72.740	9,261	5,919	9,874	0,3341
Coef. de var. (%)	11,24	11,24	0,83	15,89	0,79

Tabela I.2– Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C1-30

Número do corpo de prova	Carga de ruptura na compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Deformação em 30% da ruptura prevista (μm)	Deformação em 0,5 MPa (μm)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
1	718.884	91,53	-	-	-
2	706.152	89,91	-	-	-
3	601.492	76,58	731,5	69,0	40,3
4	711.691	90,62	731,5	73,5	40,5
5	722.984	92,05	712,8	68,1	41,4
Média	692.200	88,14	725,2	70,22	40,74
Desvio padrão	51.140	6,512	10,78	2,882	0,5897
Coef. de var. (%)	7,39	7,39	1,49	4,10	1,45

Tabela I.3– Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C1-50

Número do corpo de prova	Carga de ruptura na compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Deformação em 30% da ruptura prevista (μm)	Deformação em 0,5 MPa (μm)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
1	665.439	84,73	-	-	-
2	652.635	83,10	-	-	-
3	693.414	88,16	707,3	73,5	38,9
4	685.796	87,32	679,6	55,6	39,5
5	676.373	86,12	686,6	45,7	38,5
Média	674.500	85,88	691,2	58,27	38,95
Desvio padrão	15910	2,03	14,37	14,09	0,5231
Coef. de var. (%)	2,36	2,36	2,08	24,18	1,34

Tabela I.4– Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C2-ref

Número do corpo de prova	Carga de ruptura na compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Deformação em 30% da ruptura prevista (μm)	Deformação em 0,5 MPa (μm)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
1	593.292	75,54	-	-	-
2	598.183	76,16	-	-	-
3	537.185	68,40	545,3	38,5	43,8
4	567.396	72,24	542,3	30,5	43,4
5	573.583	73,03	535,2	21,5	43,3
Média	573.900	73,07	540,9	30,18	43,50
Desvio padrão	24270	3,090	5,171	8,520	0,294
Coef. de var. (%)	4,23	4,23	0,96	28,23	0,68

Tabela I.5 – Detalhamento do ensaio de módulo de elasticidade estático do concreto C2-100

Número do corpo de prova	Carga de ruptura na compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Deformação em 30% da ruptura prevista (μm)	Deformação em 0,5 MPa (μm)	Módulo de elasticidade estático (GPa)
1	401.666	51,14	-	-	-
2	433.100	55,14	-	-	-
3	406.989	51,82	613,1	61,0	27,9
4	348.940	44,43	592,7	51,1	28,4
5	426.842	54,35	602,4	52,0	28,0
Média	403.500	51,38	602,7	54,68	28,11
Desvio padrão	33.220	4,229	10,21	5,453	0,288
Coef. de var. (%)	8,23	8,23	1,69	9,972	1,03

**APÊNDICE J – DADOS POR CORPO DE PROVA DO ENSAIO DE TRAÇÃO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Tabela J.1 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C1-ref

Número do corpo de prova	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	Carga de ruptura na compressão diametral (Kgf)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
1	19,4	10,03	21389,0	7,00
2	19,77	10,07	19731,0	6,31
3	19,7	10,01	16204,0	5,23
4	19,81	9,95	17326,0	5,60
Média	19,67	10,015	18662,5	6,03
Desvio padrão	0,19	0,05	2338,51	0,78
Coef. de var. (%)	0,94	0,50	12,53	12,98

Tabela J.2 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C1-30

Número do corpo de prova	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	Carga de ruptura na compressão diametral (Kgf)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
1	19,73	9,90	17344,00	5,65
2	19,72	10,20	17793,00	5,63
3	19,71	10,05	20308,00	6,53
4	19,79	10,02	20378,00	6,54
Média	19,74	10,04	18955,75	6,09
Desvio padrão	0,04	0,12	1612,57	0,52
Coef. de var. (%)	0,18	1,23	8,51	8,46

Tabela J.3 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C1-50

Número do corpo de prova	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	Carga de ruptura na compressão diametral (Kgf)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
1	19,78	10,01	16677,00	5,36
2	19,78	10,11	16466,00	5,24
3	19,81	10,03	16408,00	5,26
4	19,40	10,08	13974,00	4,55
Média	19,69	10,06	15881,25	5,10
Desvio padrão	0,20	0,05	1276,74	0,37
Coef. de var. (%)	0,99	0,45	8,04	7,31

Tabela J.4 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C2-ref

Número do corpo de prova	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	Carga de ruptura na compressão diametral (Kgf)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
1	19,60	10,05	12948,00	4,18
2	19,73	10,17	18115,00	5,75
Média	19,67	10,11	15531,50	4,97
Desvio padrão	0,09	0,08	3653,62	1,11
Coef. de var. (%)	0,47	0,84	23,52	22,25

Tabela J.5 – Detalhamento do ensaio de tração por compressão diametral do concreto C2-100

Número do corpo de prova	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	Carga de ruptura na compressão diametral (Kgf)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)
1	19,50	10,07	15060,00	4,88
2	19,43	10,34	14577,00	4,62
Média	19,47	10,21	14818,50	4,75
Desvio padrão	0,05	0,19	341,53	0,19
Coef. de var. (%)	0,25	1,87	2,30	3,92