



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

PAULO HENRIQUE RIBEIRO FERRAZ

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO DE LENTES
OFTÁLMICAS NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

**RECIFE/PE
2021**

PAULO HENRIQUE RIBEIRO FERRAZ

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO DE LENTES
OFTÁLMICAS NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

**RECIFE/PE
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F381i Ferraz, Paulo Henrique Ribeiro
Incorporação de resíduos de processamento de lentes oftálmicas na produção de concreto / Paulo Henrique Ribeiro
Ferraz. - 2021.
172 f. : il.
- Orientador: Romildo Morant de Holanda.
Coorientadora: Fernanda Wanderley Correa de Araujo.
Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2021.
1. Superfície. 2. Lentes oftálmicas. 3. Concreto. 4. Polímeros. 5. Resíduos poliméricos. I. Holanda, Romildo Morant de, orient. II. Araujo, Fernanda Wanderley Correa de, coorient. III. Título

CDD 620.8

PAULO HENRIQUE RIBEIRO FERRAZ

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PROCESSAMENTO DE LENTES
OFTÁLMICAS NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovado em: 20/08/2021

Banca Examinadora

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda
Orientador – DTR/UFRPE

Prof.^a Dr.^a Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo
Coorientadora – DTR/UFRPE

Prof. Dr. Victor Casimiro Piscoya
Membro Interno – DTR/UFRPE

Prof.^a Dr.^a Kalinny Patrícia Vaz Lafayette
Membro Externo – POLI/UPE

RESUMO

A expansão do consumo de lentes oftálmicas no Brasil nas últimas décadas também desencadeou potenciais impactos ambientais devido ao descarte de resíduos provenientes do seu processamento, que consistem em aparas, oriundas da superfície e corte de lentes oftálmicas, e em lentes não aprovadas no controle de qualidade. Seus materiais são, em maior frequência, compostos de origem polimérica que, sendo um material que se decompõe lentamente quando descartado, ocasiona a sua presença em grandes quantidades tanto em aterros sanitários quanto na natureza. A expansão da indústria da construção civil resultou no crescimento dos prejuízos ambientais inerentes à suas atividades, diretos e indiretos, destacando-se àqueles originados pela demanda da extração de areia, utilizada, principalmente, na produção de concreto, relacionada a danos como emissões na atmosfera, água e solo, bem como o consumo de recursos não renováveis. Diante disso, esse estudo visou analisar a possibilidade de incorporação dos resíduos poliméricos do processamento de lentes na produção de concreto, em substituição parcial ao agregado miúdo. Dois tipos de resíduos foram coletados em um laboratório óptico localizado em Recife/PE, sendo eles o policarbonato e a resina. Os materiais foram submetidos ao ensaio de espectroscopia no infravermelho (FTIR) onde foi observada uma possível presença de álcoois/fenóis e ácido carboxílico nos resíduos de policarbonato e resina, respectivamente. Também foram determinados o teor de umidade e massa unitária de ambos, para cálculo do traço do concreto. Por meio de um estudo de dosagem, foi determinado um traço padrão, derivando-se dele os demais traços, constituídos pela substituição volumétrica da areia nos teores de 2, 6 e 10% para cada tipo de resíduo. Foram analisadas a trabalhabilidade, resistência à compressão, à tração na flexão, absorção de água, índice de vazios e massa específica. No total, foram realizados 178 ensaios. Observou-se uma redução na consistência do concreto nos traços com incorporação de resíduos, sendo necessário o acréscimo de água para atingir o abatimento estabelecido. Os resultados obtidos possibilitariam o emprego desse concreto em pavimentos de concreto, pavimentos permeáveis, pisos industriais, galerias celulares e estruturas em ambientes de classe III de agressividade ambiental.

Palavras-chave: Superfície, lentes oftálmicas, concreto, polímeros, resíduos poliméricos.

ABSTRACT

The expansion of the consumption of ophthalmic lenses in Brazil in recent decades has also triggered potential environmental impacts due to the disposal of waste from their processing, which consists of shavings from the surfacing and cutting of ophthalmic lenses, and lenses not approved in quality control. Its materials are, more often, composed of polymeric origin which, being a material that decomposes slowly when discarded, causes its presence in large quantities both in landfills and in nature. The expansion of the civil construction industry resulted in the growth of environmental damages inherent to its activities, direct and indirect, especially those caused by the demand for sand extraction, mainly used in the production of concrete, related to damages such as emissions into the atmosphere, water and land, as well as the consumption of non-renewable resources. Therefore, this study aimed to analyze the possibility of incorporating polymeric waste from lens processing in the production of concrete, in partial replacement of fine aggregate. Two types of waste were collected in an optical laboratory located in Recife/PE, polycarbonate and resin. The materials were submitted to infrared spectroscopy (FTIR) where a possible presence of alcohols/phenols and carboxylic acid was observed in the polycarbonate and resin residues, respectively. The moisture content and unit mass of both were also determined to calculate the concrete mix. Through a dosage study, a standard mix was determined, deriving from it the other mixes, constituted by the volumetric replacement of sand in the contents of 2, 6 and 10% for each type of waste. Workability, compressive strength, bending tensile strength, water absorption, void index and specific mass were analyzed. Altogether, 178 samples were experimented. A reduction in the consistency of the concrete in the mixes with residue incorporation was observed, being necessary the addition of water to reach the established abatement. The results obtained would enable the use of this concrete in concrete pavements, permeable pavements, industrial floors, cell galleries and structures in environments of class III of environmental aggressiveness.

Keywords: Lens surfacing, ophthalmic lenses, concrete, polymers, polymeric wastes.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Histórico de venda de pares de lentes oftálmicas no Brasil entre os anos de 2005 e 2018. | 16 |
| Figura 2 - Representação de uma molécula linear..... | 18 |
| Figura 3 - Modos vibracionais da H ₂ O. A) Deformação axial simétrica. B) Deformação axial assimétrica. C) Deformação angular simétrica. | 22 |
| Figura 4 - Modos de vibração mais simples. A) Estiramento. B) Dobramento | 23 |
| Figura 5 - Diagrama esquemático do espectrômetro por transformada de Fourier | 24 |
| Figura 6 - Espectro infravermelho padrão para o policarbonato | 24 |
| Figura 7 - Intensidades de sinais em um espectro IV | 25 |
| Figura 8 - Representação de sinal largo (A) e estreito (B) | 26 |
| Figura 9 - Faixas de absorção de vários tipos comuns de ligação | 26 |
| Figura 10 - Lente semi-acabada (patela) | 27 |
| Figura 11 - Fluxo de resíduos do processamento de lentes oftálmicas | 28 |
| Figura 12 - Aparas de policarbonato | 29 |
| Figura 13 - Lentes usadas de sucata | 29 |
| Figura 14 - Proporções dos componentes do cimento Portland | 31 |
| Figura 15 - Contribuição dos compostos para o ganho de resistência à compressão do cimento | 33 |
| Figura 16 - Consumo de cimento Portland no ano de 2018 | 35 |
| Figura 17 - Separação granulométrica de amostra de areia..... | 40 |
| Figura 18 - Limites para espaçamento entre barras em função da dimensão do agregado | 43 |
| Figura 19 - Influência da granulometria dos agregados | 44 |
| Figura 20 - Fatores básicos do processo de dosagem..... | 48 |
| Figura 21 - Gráfico para a obtenção da relação a/c em função da resistência à compressão do concreto e cimento aos 28 dias | 52 |
| Figura 22 - Fluxograma simplificado do método ABCP..... | 57 |
| Figura 23 - Modelo de diagrama de dosagem | 59 |
| Figura 24 - Comparativo entre a resistência média obtida aos 28 dias (f_{cm28}) e a relação água/cimento (a/c) para cada método de dosagem | 65 |
| Figura 25 - Comparativo entre o consumo de cimento e resistências à compressão aos 28 dias (f_{c28}) prefixadas, para cada método | 66 |
| Figura 26 - Resistência dos concretos aos 7 e 28 dias de idade | 67 |
| Figura 27 - Exemplo real de medição do abatimento..... | 69 |
| Figura 28 - Ruptura de concretos com $F_{ck} \leq 40\text{Mpa}$ | 72 |
| Figura 29 - Distribuição da densidade de frequência relativa $p(X_i)$ e das resistências X_i | 74 |
| Figura 30 - Distribuição de Gauss com indicação do f_{ck} | 75 |
| Figura 31 - Representação da diferença entre a média e uma tensão qualquer | 75 |
| Figura 32 - Resultados dos desvios padrão do estudo realizado | 76 |
| Figura 33 - Impactos ambientais na produção do concreto armado | 82 |
| Figura 34 - Espectrofotômetro FTIR utilizado no ensaio..... | 86 |
| Figura 35 - Policarbonato | 87 |
| Figura 36 - Resina | 87 |
| Figura 37 - Cápsulas com resíduos em secagem na estufa..... | 88 |
| Figura 38 - Recipiente para aferição da massa unitária dos resíduos | 89 |
| Figura 39 - Frasco de Le Chatelier | 90 |
| Figura 40 - Proveta graduada | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figura 41 - Frasco aferido usado na determinação da massa específica da areia..... | 92 |
| Figura 42 - Frasco de Chapman..... | 94 |
| Figura 43 - Molde usado para o ensaio de abatimento | 99 |
| Figura 44 - Prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão | 101 |
| Figura 45 - Prensa com dispositivo para tração na flexão, usada nos ensaios. | 102 |
| Figura 46 - Espectro infravermelho do resíduo de policarbonato | 104 |
| Figura 47 - Espectro infravermelho do resíduo de resina..... | 105 |
| Figura 48 - Processo de obtenção da umidade dos resíduos. A) Pesagem do recipiente. B) Pesagem do resíduo de policarbonato úmido. C) Pesagem do resíduo de policarbonato seco. D) Pesagem do recipiente. E) Pesagem do resíduo de resina úmido. F) Pesagem do resíduo de resina seco. | 107 |
| Figura 49 - Pesagem das amostras. A) Policarbonato. B) Resina | 108 |
| Figura 50 – Aferição da massa específica do cimento Portland. A) Frasco com xileno. B) Frasco com xileno e cimento Portland. | 109 |
| Figura 51 - Ensaio de massa unitária. A) Pesagem da proveta vazia. B) Pesagem da proveta preenchida com cimento. C) Pesagem da proveta com água para aferição. | 110 |
| Figura 52 - Pesagem de frasco com areia após introdução de água | 111 |
| Figura 53 - Aferição do recipiente usado na obtenção da massa unitária dos agregados..... | 112 |
| Figura 54 - Frasco de Chapman após ensaio | 113 |
| Figura 55 - Curva granulométrica da areia e dos limites estabelecidos em norma | 114 |
| Figura 56 - Pesagem do agregado graúdo submerso | 115 |
| Figura 57 - Curva granulométrica do agregado graúdo e as zonas granulométricas estabelecidas em norma | 117 |
| Figura 58 - Abatimento de tronco de cone | 121 |
| Figura 59 - Gráfico dos valores da relação água/cimento em função do teor de resíduo de policarbonato | 124 |
| Figura 60 - Gráfico dos valores da relação água/cimento em função do teor de resíduo de resina..... | 124 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Composição, índice de refração e densidade de materiais orgânicos..... | 20 |
| Tabela 2 - Características de materiais usados em lentes oftálmicas | 21 |
| Tabela 3- Limites usuais na composição do cimento Portland | 31 |
| Tabela 4 - Principais compostos do cimento Portland | 32 |
| Tabela 5 – Proporção típica dos compostos do cimento Portland após calcinação..... | 32 |
| Tabela 6 - Calor de hidratação dos compostos do cimento | 33 |
| Tabela 7 - Tipos de cimento Portland segundo NBR 16.697 | 34 |
| Tabela 8 - Produção anual de cimento Portland segundo os tipos (1.000 toneladas) | 34 |
| Tabela 9 - Percentual anual produzido de cimento Portland segundo os tipos | 35 |
| Tabela 10 - Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos | 35 |
| Tabela 11 - Aplicações de diferentes tipos de cimento Portland..... | 36 |
| Tabela 12 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal) | 40 |
| Tabela 13 - Classificação das areias segundo o tamanho..... | 41 |
| Tabela 14 - Módulos de finura segundo tamanho da areia..... | 42 |
| Tabela 15 - Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo | 42 |
| Tabela 16 - Classificação das britas de acordo com a dimensão..... | 43 |
| Tabela 17 - Limites de distribuição granulométrica do agregado graúdo | 44 |
| Tabela 18 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto | 49 |
| Tabela 19 - Desvio padrão do concreto em função da condição de preparo | 49 |
| Tabela 20 - Condições de preparo do concreto | 50 |
| Tabela 21 - Relação a/c em concretos submetidos a situações severas..... | 52 |
| Tabela 22 - Consumo de água aproximado (l/m ³)..... | 53 |
| Tabela 23 - Volume compactado seco de agregado graúdo por m ³ de concreto..... | 54 |
| Tabela 24 - Apresentação do traço em massa para uma unidade de cimento | 56 |
| Tabela 25 - Constantes para correlação entre a resistência à compressão do concreto e a relação a/c para cada tipo e classe de cimento..... | 61 |
| Tabela 26 - Quantidade de água e abatimento no traço para cada relação a/c em cada método | 64 |
| Tabela 27 - Características obtidas para cada método de dosagem..... | 67 |
| Tabela 28 - Classes de consistência do concreto | 70 |
| Tabela 29 - Classes de resistência de concretos estruturais..... | 73 |
| Tabela 30 - Métodos de adensamento em função das classes de consistência..... | 73 |
| Tabela 31 - Valores de "t" em função da probabilidade P% | 76 |
| Tabela 32 - Resultados dos concretos produzidos no Brasil | 76 |
| Tabela 33 - Valores de Ψ_6 | 77 |
| Tabela 34 - Coeficiente de distribuição de Student | 80 |
| Tabela 35 - Massa específica da água | 93 |
| Tabela 36 - Identificação dos traços | 97 |
| Tabela 37 - Quantitativo de corpos de prova moldados | 98 |
| Tabela 38 - Umidades das amostras de policarbonato | 106 |
| Tabela 39 - Umidades das amostras de resina | 106 |
| Tabela 40 - Massa unitária das amostras de policarbonato | 108 |
| Tabela 41 - Massa unitária das amostras de resina..... | 108 |
| Tabela 42 - Massa unitária do cimento..... | 110 |
| Tabela 43 - Valores médios das massas específicas obtidas para a areia..... | 111 |
| Tabela 44 - Composição granulométrica do agregado miúdo..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 45 - Valores das massas específicas obtidas para a brita..... | 116 |
| Tabela 46 - Composição granulométrica do agregado graúdo | 117 |
| Tabela 47 - Traço do concreto padrão, desconsiderando a umidade da areia. | 119 |
| Tabela 48 - Volume real dos componentes para 1 m ³ de concreto..... | 119 |
| Tabela 49 - Volume real e massa necessária para a moldagem de um corpo de prova..... | 120 |
| Tabela 50 - Traços para a produção dos corpos de prova | 121 |
| Tabela 51 - Relação água/cimento média para alcance do abatimento fixado | 122 |
| Tabela 52 - Parâmetros estatísticos dos traços para a resistência à compressão | 125 |
| Tabela 53 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos com resíduo de policarbonato..... | 126 |
| Tabela 54 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos com resíduo de resina | 126 |
| Tabela 55 - Parâmetros estatísticos dos traços para a resistência à tração na flexão | 128 |
| Tabela 56 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à tração na flexão dos concretos com resíduo de policarbonato | 129 |
| Tabela 57 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à tração na flexão dos concretos com resíduo de resina..... | 129 |
| Tabela 58 - Valores encontrados para a absorção de água, índice de vazios e massas específicas..... | 130 |
| Tabela 59 - Resultados do teste de Tukey para a absorção de água e índice de vazios dos concretos com resíduo de policarbonato | 131 |
| Tabela 60 - Resultados do teste de Tukey para a absorção de água e índice de vazios dos concretos com resíduo de resina..... | 132 |
| Tabela 61 - Resultados do teste de Tukey para as massas específicas dos concretos com resíduo de policarbonato..... | 133 |
| Tabela 62 - Resultados do teste de Tukey para as massas específicas dos concretos com resíduo de resina | 134 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2. | OBJETIVOS | 15 |
| 2.1. | OBJETIVO GERAL..... | 15 |
| 2.2. | OBJETIVOS ESPECÍFICOS:..... | 15 |
| 3. | REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 3.1. | LENTE OFTÁLMICAS | 16 |
| 3.1.1. | Origem e características dos polímeros..... | 17 |
| 3.1.2. | Polímeros utilizados nas lentes oftálmicas | 18 |
| 3.1.3. | Características dos polímeros utilizados nas lentes | 19 |
| 3.1.4. | Espectroscopia de infravermelho como técnica para identificação dos componentes químicos contidos nos resíduos da fabricação das lentes oftálmicas | 21 |
| 3.1.4.1. | Funcionamento da espectroscopia de infravermelho | 21 |
| 3.1.4.2. | Interpretação do espectro infravermelho | 25 |
| 3.1.5. | Processo de fabricação das lentes..... | 26 |
| 3.1.6. | Impactos Ambientais..... | 28 |
| 3.2. | CONCRETO | 30 |
| 3.2.1. | Cimento Portland | 30 |
| 3.2.2. | Agregados..... | 39 |
| 3.2.3. | Dosagem | 46 |
| 3.2.3.1. | Método da ABCP/ACI | 50 |
| 3.2.3.2. | Método do IPT/EPUSP | 58 |
| 3.2.3.3. | Estudos comparativos entre os métodos de dosagem..... | 63 |
| 3.2.4. | Trabalhabilidade | 68 |
| 3.2.5. | Resistência à compressão | 71 |
| 3.2.6. | Resistência à tração na flexão..... | 78 |
| 3.2.7. | Massa específica..... | 80 |
| 3.2.8. | Absorção de água..... | 81 |
| 3.2.9. | Impactos Ambientais..... | 82 |
| 4. | MATERIAL E MÉTODOS | 85 |
| 4.1. | TIPOLOGIA DA PESQUISA | 85 |
| 4.2. | PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 86 |
| 4.2.1. | Caracterização química e física do resíduo..... | 86 |
| 4.2.2. | Amostragem e caracterização dos componentes do concreto | 89 |
| 4.2.2.1. | Cimento Portland..... | 89 |
| 4.2.2.2. | Agregado miúdo | 91 |
| 4.2.2.3. | Agregado graúdo | 95 |
| 4.2.3. | Dosagem do concreto..... | 96 |
| 4.2.4. | Identificação dos traços..... | 96 |
| 4.2.5. | Mistura do Concreto | 97 |
| 4.2.6. | Moldagem e Cura de Corpos de Prova | 97 |
| 4.2.7. | Número de corpos de prova..... | 98 |
| 4.2.8. | Ensaio de abatimento de tronco de cone | 98 |
| 4.2.9. | Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica | 99 |
| 4.2.10. | Ensaio de resistência à compressão | 100 |
| 4.2.11. | Ensaio de resistência à tração na flexão..... | 101 |
| 4.2.12. | Análise dos resultados..... | 102 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 104 |
| 5.1. | CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DOS RESÍDUOS | 104 |
| 5.1.1. | Espectro infravermelho do resíduo de policarbonato..... | 104 |
| 5.1.2. | Espectro infravermelho do resíduo de resina | 105 |
| 5.1.3. | Determinação do teor de umidade | 106 |
| 5.1.4. | Determinação da massa unitária | 107 |
| 5.2. | CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO CONCRETO..... | 108 |
| 5.2.1. | Cimento Portland | 109 |
| 5.2.1.1. | Massa específica..... | 109 |
| 5.2.1.2. | Massa unitária..... | 109 |
| 5.2.2. | Agregado miúdo | 110 |
| 5.2.2.1. | Massa específica..... | 111 |
| 5.2.2.2. | Massa unitária..... | 112 |
| 5.2.2.3. | Teor de umidade | 112 |
| 5.2.2.4. | Granulometria..... | 113 |
| 5.2.3. | Agregado graúdo | 115 |
| 5.2.3.1. | Massa específica e absorção de água | 115 |
| 5.2.3.2. | Massa unitária..... | 116 |
| 5.2.3.3. | Teor de umidade | 116 |
| 5.2.3.4. | Granulometria..... | 116 |
| 5.3. | ESTUDO DE DOSAGEM E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS | 118 |
| 5.3.1. | Determinação do consumo de água (C_a)..... | 118 |
| 5.3.2. | Determinação do consumo de cimento (C)..... | 118 |
| 5.3.3. | Determinação do consumo de agregado graúdo (C_b) e miúdo (C_m) | 118 |
| 5.3.4. | Definição do traço..... | 119 |
| 5.4. | ANÁLISE DA TRABALHABILIDADE E ÁGUA ADICIONADA..... | 121 |
| 5.5. | ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | 125 |
| 5.6. | ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO..... | 127 |
| 5.7. | ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA | 130 |
| 6. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS..... | 136 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 138 |
| | ANEXO A – Laudo fornecido pelo fabricante do cimento | 151 |
| | APÊNDICE A – Ensaio dos componentes do concreto | 152 |
| | APÊNDICE B – Ensaio de resistência à compressão traço padrão (T-0)..... | 155 |
| | APÊNDICE C – Ensaio de resistência à compressão traço T_P-2%..... | 156 |
| | APÊNDICE D – Ensaio de resistência à compressão traço T_P-6%..... | 157 |
| | APÊNDICE E – Ensaio de resistência à compressão traço T_P-10% | 158 |
| | APÊNDICE F – Ensaio de resistência à compressão traço T_R-2% | 159 |
| | APÊNDICE G – Ensaio de resistência à compressão traço T_R-6% | 160 |
| | APÊNDICE H – Ensaio de resistência à compressão traço T_R-10% | 161 |
| | APÊNDICE I – Ensaio de resistência à tração na flexão traço padrão (T-0)..... | 162 |
| | APÊNDICE J – Ensaio de resistência à tração na flexão traço T_P-2% | 163 |
| | APÊNDICE K – Ensaio de resistência à tração na flexão traço T_P-6% | 164 |
| | APÊNDICE L – Ensaio de resistência à tração na flexão traço T_P-10%..... | 165 |
| | APÊNDICE M – Ensaio de resistência à tração na flexão traço T_R-2% | 166 |
| | APÊNDICE N – Ensaio de resistência à tração na flexão traço T_R-6% | 167 |
| | APÊNDICE O – Ensaio de resistência à tração na flexão traço T_R-10% | 168 |
| | APÊNDICE P – Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica para | |

todos os traços 169

1. INTRODUÇÃO

A indústria oftálmica é um segmento de grande atuação no Brasil. De acordo as estatísticas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (BRASIL, 2021), foram comercializados mais de 34 milhões de pares de lentes para óculos em todo o país, no ano de 2018, tendo havido um crescimento considerável nas últimas décadas. A produtividade do setor traz consigo resíduos oriundos do processo, que podem causar sérios danos ambientais caso não sejam corretamente descartados. Segundo Ruivinho (2010), em Portugal, foram geradas 284,5 toneladas de aparas úmidas oriundas do processo de superfície e corte em laboratório de lentes oftálmicas, sendo destes, 219 toneladas referentes à fração seca, no ano de 2008.

Os materiais utilizados para a fabricação de lentes oftálmicas consistem basicamente em matérias orgânicas (plásticas), constituídas por polímeros sintéticos (RUIVINHO, 2010). A utilização de grandes quantidades de materiais poliméricos associada ao seu longo período para degradação ocasiona uma maior abundância de resíduos desta natureza (NEVES, 2015; SILVA, 2016). No entanto, Silva (2016) afirma que os problemas ambientais são ocasionados apenas pelo descarte inadequado dos polímeros, apresentando sua reciclagem sistemática como solução para minimizar o impacto ambiental gerado. Vale salientar que, mesmo com a destinação adequada dos resíduos, o seu acúmulo devido à lenta degradação ocasiona a redução da vida útil nos aterros sanitários. Nesse contexto, Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) possui como diretrizes de gerenciamento, em ordem de prioridade, a não geração de resíduos, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada dos rejeitos.

Uma pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no ano de 2019 (ABRELPE, 2020), verificou que 40,5% dos resíduos sólidos gerados no Brasil são destinados de forma inadequada, ou seja, em aterro controlado ou lixão a céu aberto. O mesmo estudo ainda confirmou que os materiais plásticos representam 16,8% dos resíduos sólidos urbanos, ocupando uma fração de 48% dos resíduos recicláveis produzidos no país. No estado de Pernambuco, um levantamento realizado pelo Tribunal de Contas do Estado (TCE-PE), em 2020 (PERNAMBUCO, 2021), constatou que 38,6% dos municípios utilizam lixões como destino ambientalmente incorreto para os resíduos sólidos.

A expansão da indústria da construção civil trouxe consigo maiores impactos

ambientais, com o aumento do consumo de água, energia e recursos naturais, bem como a geração de resíduos sólidos (GONÇALVES, 2016). Seus impactos ambientais negativos da podem ser observados no processo de extração da matéria prima, não renovável, na fabricação dos materiais, na execução das obras e na disposição final dos resíduos gerados, que favorecem a formação de áreas degradadas (ROTH; GARCIA, 2009).

Gonçalves (2016) destaca a importância da busca de soluções para atenuação dos impactos ambientais provocados pelas atividades do setor, com maior ênfase ao uso racional de recursos naturais e ao descarte dos resíduos. A construção civil é uma das maiores consumidoras de areia, tendo absorvido 68,96% da produção bruta em 2009, de acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (BRASIL, 2010). Em 2014, foram produzidos 439 milhões de toneladas de areia, conforme divulgado pela Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC, 2015).

A ANEPAC (2011) ressalta que o concreto é o segundo produto mais consumido no mundo, sendo 70% do seu volume constituído por areia e brita. Segundo Pedrosa (2009), a produção nacional anual em centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos. Acrescenta-se, ainda, que metade da areia consumida na construção civil é incorporada à produção de concreto, de acordo com Ferreira e Fonseca Júnior (2012). Tal valor seria 219,5 milhões de toneladas, considerando a produção de 2014 divulgada pela ANEPAC (2015).

Estudos realizados com materiais poliméricos comprovaram a viabilidade técnica e econômica de seu uso em concretos, tanto na sua moldagem *in loco* quanto na fabricação de artefatos pré-moldados, em substituição ao agregado miúdo, mantendo suas características compatíveis ao exigido pelas normas técnicas brasileiras.

Nessas circunstâncias, faz-se necessária a viabilização de alternativas para o reaproveitamento dos resíduos poliméricos oriundos do processamento de lentes oftálmicas, onde se observa o seu potencial uso na fabricação de concreto, como substituto de parte do agregado miúdo da sua composição.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho do concreto de cimento Portland com a incorporação de resíduos provenientes do processamento de lentes oftálmicas, em substituição parcial ao agregado miúdo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- a) Caracterização física e química dos resíduos oriundos do processamento de lentes oftálmicas.
- b) Analisar a influência do teor de resíduo incorporado nas propriedades do concreto, através de ensaios de laboratório padronizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo elas:
- c) Avaliar o atendimento aos parâmetros definidos em normas e recomendações técnicas de diversos usos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

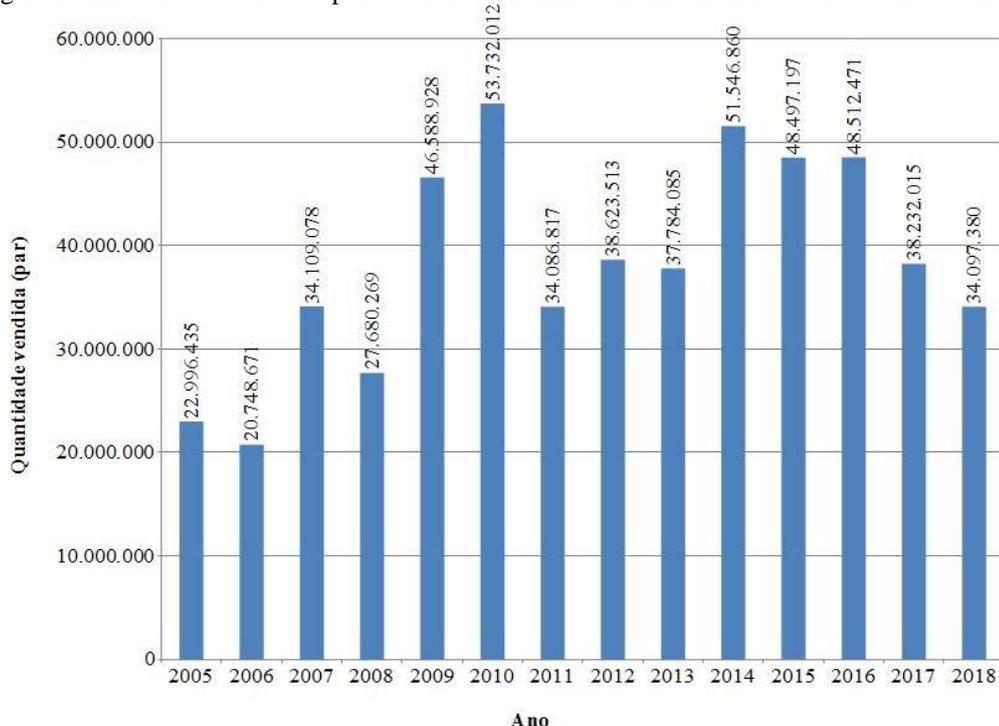
Este capítulo é dividido duas partes. Primeiramente é realizada uma abordagem a respeito dos materiais e sua caracterização, além do processo de fabricação das lentes oftálmicas e os impactos ambientais dos seus resíduos. Em seguida, são apresentados os materiais, métodos de dosagem, características e os impactos ambientais referentes ao concreto.

3.1. LENTES OFTÁLMICAS

Apesar das variações ocorridas nas últimas décadas, foi observado um crescimento em cerca de 48% na comercialização de lentes para óculos entre os anos de 2005 e 2018, de acordo com dados do IBGE (BRASIL, 2021), conforme evolução demonstrada na Figura 1. O maior volume de vendas do período ocorreu em 2010, com o total de 53.732.012 pares de lente. Em todo período supracitado, foram comercializados 537.235.731 pares, totalizando-se 1.074.471.462 unidades.

Acrescenta-se que, no município de Recife, estão registradas 21 empresas que possuem os serviços de laboratório óptico como atividade principal, de acordo com o Portal de Dados Abertos da Prefeitura da cidade (RECIFE, 2021).

Figura 1 - Histórico de venda de pares de lentes oftálmicas no Brasil entre os anos de 2005 e 2018.



Fonte: Brasil (2021)

Atualmente, os materiais mais empregados na produção de lentes oftálmicas são os polímeros de origem sintética, enquanto as lentes de vidro encaminham ao desuso, devido a problemas de segurança, seu peso e fatores estéticos (RUIVINHO, 2010). Segundo Altidis (2010) as lentes de vidro (inorgânicas) vêm sendo substituídas de forma gradual pelos materiais poliméricos (orgânicos), onde as mesmas representam apenas 10% das vendas nos dias de hoje. Acrescenta-se, ainda, que os materiais poliméricos são mais leves e fornecem maior segurança e conforto ao usuário devido ao seu índice de refração permitir a produção de lentes mais finas e resistentes ao impacto (ALTIDIS, 2010).

3.1.1. Origem e características dos polímeros

Conforme Akcelrud (2007), os polímeros são compostos de origem natural ou sintético, formado pela repetição de muitas unidades químicas, sendo estes considerados macromoléculas. O mesmo complementa que as substâncias de onde os polímeros são oriundos, por reação química, são denominadas de monômeros, e sendo as unidades repetitivas ou meros aquelas que se repetem ao longo da cadeia polimérica.

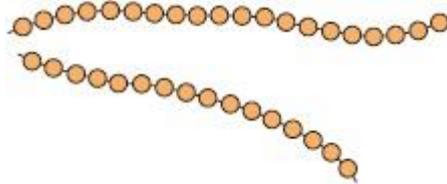
A identificação da cadeia polimérica é realizada através de sua unidade estrutural, pois um polímero pode ter de 10.000 a 1.000.000 de unidades monoméricas, impossibilitando a representação de sua totalidade (NEWEL, 2018). Vale salientar que embora monômero e mero possuam diferentes definições, às vezes o termo monômero ou unidade de monômero são empregados para referenciar as unidades repetitivas (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2015).

Quanto a sua obtenção, Piatti e Rodrigues (2005) citam que os monômeros de origem sintética são obtidos através da nafta, uma das frações derivadas do petróleo, de onde se originam os petroquímicos básicos como o propileno e etileno, que são transformados em petroquímicos finos como o polipropileno e o polietileno. No entanto, Suzin (2020) menciona que as principais matérias primas empregadas na produção de polímeros são provenientes do gás natural (metano, etano) e do petróleo (nafta, gasóleo e GLP).

Smith e Hashemi (2012) classificam os materiais poliméricos, de acordo com suas estruturas e ligações químicas, em termoplásticos e termofixos. Os polímeros termoplásticos são remoldáveis, podendo ser moldados por diversas vezes quando aquecidos, sem a alteração significativa de sua estrutura molecular (NEVES, 2015; PARENTE, 2006; SMITH; HASHEMI, 2012). Tal característica, aliada à sua baixa densidade, boa aparência,

isolamentos térmico e elétrico, resistência ao impacto e baixo custo fazem com que os termoplásticos possuam aplicações diversificadas (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005). Acrescenta-se que, de acordo com Pinheiro e Crivelaro (2020), tal característica os torna materiais recicláveis. Os referidos polímeros constituem-se de componentes orgânicos que ocorrem na forma granular arranjados em moléculas lineares que não são interconectadas por ligação química (GANGARAO; TALY; VIJAY, 2007). Os polímeros lineares são aqueles em que as unidades de repetição são unidas em cada extremidade por uma cadeia simples (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2015), conforme ilustrado na Figura 2. Dentre os polímeros termoplásticos comumente usados podemos citar o policarbonato, poliuretano, policloreto de vinilo (PVC), polietileno tereftalato (PET), entre outros (PINHEIRO; CRIVELARO, 2020).

Figura 2 - Representação de uma molécula linear



Fonte: Callister Jr e Rethwisch (2015)

Os polímeros termofixos, também conhecidos como termorrígidos ou termoendurecíveis, podem ser aquecidos e moldados uma única vez, podendo levar a sua decomposição ou degradação no caso de reaquecimento do polímero acabado a temperaturas altas (ALTIDIS, 2010; NEVES, 2015; PARENTE, 2006; SMITH; HASHEMI, 2012). Segundo Pinheiro e Crivelaro (2020), tais polímeros são materiais não recicláveis devido às características supracitadas. Os materiais usados na sua produção constituem-se de produtos químicos líquidos de baixo peso molecular e viscosidade, e suas moléculas são unidas por ligações cruzadas entre as moléculas lineares, formando uma estrutura tridimensional (GANGARAO; TALY; VIJAY, 2007). Entre os polímeros termorrígidos mais conhecidos estão os poliésteres, epóxis, elastômeros, entre outros (PINHEIRO; CRIVELARO, 2020).

3.1.2. Polímeros utilizados nas lentes oftálmicas

Os materiais poliméricos transparentes são denominados, conforme Silva (2002), de plásticos ópticos. O autor ainda cita o índice de refração, estabilidade térmica, resistência à abrasão e facilidade de processamento como parâmetros para a aplicação óptica desse material. O mesmo também menciona fatores como custo, peso e transmissão da luz como

vantagens do uso de polímeros em relação aos vidros. Segundo Cruz (1997), alguns materiais plásticos possuem transparência superior a muitos vidros ópticos de alta qualidade e, ainda, transmitem os raios ultravioletas do sol, que são absorvidos pelos vidros.

Meslin (2010) afirma que algumas dificuldades iniciais na aplicação desses materiais foram superadas, como a resistência ao risco aumentada por meio de vernizes endurecedores e a espessura reduzida por materiais de índice de refração elevado. O autor complementa que os referidos materiais se tornaram materiais de referência da óptica oftálmica.

Cruz (1997) e Silva (2002) apontam o acrílico (polimetacrilato de metila), poliestireno, policarbonato e CR-39[®] (carbonato diglicol de alila) como alguns dos principais plásticos ópticos.

Altidis (2010) afirma que a maior parte das lentes oftálmicas orgânicas produzidas é constituída de polímeros termofixos. O autor cita o CR-39[®], a Resina Orma[®] 15 e os plásticos de alto índice de refração como principais termofixos utilizados para a fabricação de lentes oftálmicas, bem como o policarbonato como material termoplástico utilizado para tal fim. Além destes, Ruivinho (2010) ainda cita o poliuretano como material termoplástico também utilizado para a confecção de lentes oftálmicas, e o Trivex[®] como combinação das melhores características do Policarbonato e do CR-39[®].

Meslin (2010) classifica os materiais orgânicos usados nas lentes oftálmicas em quatro categorias, pelo seu índice de refração (n): de índice corrente ($1,48 \leq n < 1,50$), de médio índice ($1,54 \leq n < 1,64$), de alto índice ($1,64 \leq n < 1,74$) e de muito alto índice ($n \geq 1,74$). No primeiro caso, o autor cita o CR-39[®] e a resina Orma[®] como exemplos. Como materiais de médio índice, o mesmo menciona o policarbonato e algumas resinas termorrígidas como a Ormex[®] e Ormil[®]. Por último, são referenciadas as resinas Styli[®] e Lineis[®] como materiais de índice alto e muito alto, respectivamente.

3.1.3. Características dos polímeros utilizados nas lentes

A densidade de um material, que depende da sua natureza e composição química, varia consideravelmente, sendo diretamente proporcional a seu índice de refração (MESLIN, 2010). O autor complementa que tal fato se deve ao aumento desse índice decorre da introdução de átomos mais pesados na estrutura química do material, conforme exemplificado na Tabela 1, com algumas resinas presentes no mercado. Na referida tabela observa-se que o índice de refração e a densidade dos materiais são diretamente proporcionais ao teor de

enxofre, que possui massa atômica superior aos demais elementos.

Tabela 1 - Composição, índice de refração e densidade de materiais orgânicos.

| | Orma [®] | Ormix [®] / Thin&Lite [®] | Stylis [®] | Lineis [®] |
|--------------------------------|-------------------|--|---------------------|---------------------|
| Carbono % | 65 | 54 | 48 | 36 |
| Oxigênio % | 25 | 8 | 10 | 1 |
| Azoto % | - | 7 | 8 | - |
| Enxofre % | - | 24 | 29 | 58 |
| Hidrogênio % | 10 | 7 | 5 | 5 |
| Índice de refração | 1,5 | 1,6 | 1,67 | 1,74 |
| Densidade (g/cm ³) | 1,32 | 1,31 | 1,36 | 1,47 |

Fonte: Meslin (2010)

Vale salientar que o desenvolvimento dos materiais ópticos tem por objetivo a obtenção de materiais mais leves e com melhores propriedades ópticas (MESLIN, 2010; RUIVINHO, 2010). Na Tabela 2 se encontram os índices de refração e a densidade de alguns materiais orgânicos (polímeros) e minerais. Vale salientar que na tabela supramencionada também se encontram as designações comerciais dos produtos citados junto com as empresas fabricantes dos mesmos, conforme mencionado por Meslin (2010).

Uma pesquisa de experiência com usuários de lentes, realizada por Morse e Leung (2013), observou a preferência do Trivex[®] em relação ao policarbonato, onde apenas a espessura apresentou resultados similares de ambos. Acrescenta-se que foi observada a qualidade da visão através das lentes, além de avaliar a percepção dos usuários quanto à espessura e sua resistência.

Diallo *et al.* (2001) analisaram a resistência mecânica em lentes com três polímeros distintos: CR-39[®], poliuretano e policarbonato, onde este último mostrou-se consideravelmente superior aos demais. O CR-39[®] apresentou a mais baixa resistência para as espessuras e curvaturas comparáveis.

Tabela 2 - Características de materiais usados em lentes oftálmicas

| Classificação | Tipo | Designação Comercial | Índice de Refração (n_e / n_d) | Densidade (g/cm^3) |
|---------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Materiais Orgânicos | Índice Corrente | Orma [®] (Essilor) | 1,502 / 1,500 | 1,32 |
| | Médio Índice | Airwear [®] (Essilor) | 1,591 / 1,586 | 1,20 |
| | Médio Índice | Ormix [®] (Essilor) | 1,596 / 1,592 | 1,31 |
| | Alto Índice | Stylis [®] (Essilor) | 1,665 / 1,660 | 1,36 |
| | Muito Alto Índice | Lineis [®] (Essilor) | 1,734 / 1,738 | 1,37 |
| Materiais Minerais | Baixo Índice | Stigmal 15 (Essilor) | 1,525 / 1,523 | 2,61 |
| | Médio Índice | Stigmal 16 (Essilor) | 1,604 / 1,600 | 2,63 |
| | Alto Índice | Fit 40 (Essilor) | 1,705 / 1,701 | 3,21 |
| | Muito Alto Índice | Stigmal 18 (Essilor) | 1,807 / 1,802 | 3,65 |
| | Muito Alto Índice | 19 (BBGR) | 1,892 / 1,885 | 3,99 |

Fonte: Meslin (2010)

3.1.4. Espectroscopia de infravermelho como técnica para identificação dos componentes químicos contidos nos resíduos da fabricação das lentes oftálmicas

Espectroscopia consiste no estudo da interação da radiação eletromagnética com a matéria, que ocorre por absorção, emissão e espalhamento da radiação (KAWANO, 2003). A referida análise tem como objetivo a obtenção de informações físicas e químicas sobre o material (TARECO, 2019).

3.1.4.1. Funcionamento da espectroscopia de infravermelho

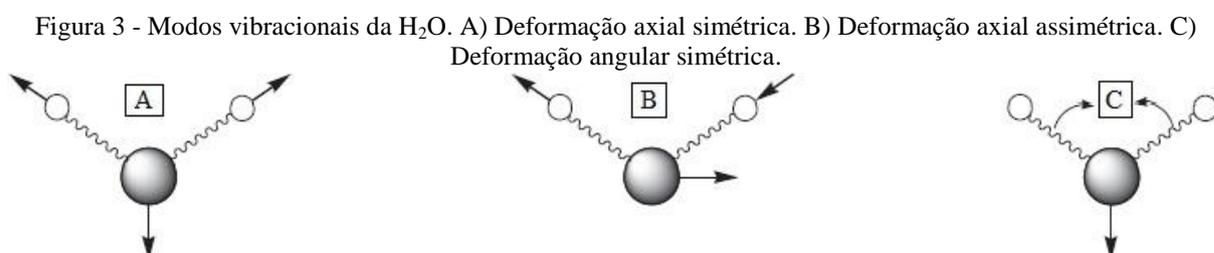
A espectroscopia de infravermelho respalda-se nas ligações químicas das substâncias, que possuem frequências específicas de vibração, que correspondem a níveis de energia da molécula, denominados níveis vibracionais (TARECO, 2019). O autor ainda cita que a luz da radiação eletromagnética será absorvida pela molécula caso esta possua a mesma energia de suas vibrações. Segundo Pavia *et al.* (2015), cada tipo de ligação tem sua própria frequência

de vibração, e dado que a mesma ligação em diferentes compostos está em ambientes distintos, os espectros infravermelhos em diversas moléculas jamais serão idênticos.

O espectro de emissão ou absorção é obtido quando as moléculas sofrem transição entre estados quânticos correspondentes a duas energias internas diferentes (ALMEIDA; SOUZA, 2015). Além disso, os autores complementam que as frequências do infravermelho com comprimento de onda entre 1 e 50 mm estão associadas a vibração molecular e a movimentos de vibração-rotação das moléculas.

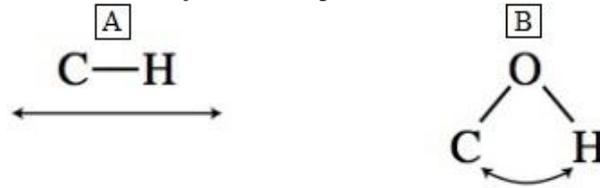
Segundo Pavia *et al.* (2015) uma molécula absorve apenas frequências de radiação no infravermelho, que corresponde a alterações de energia entre 8 a 40 kJ/mol. Os mesmos ainda mencionam que essa radiação, na referida faixa de energia, abrange frequências vibracionais de estiramento e dobramento nas ligações da maioria das moléculas mais covalentes. De acordo com Leite e Prado (2012), obtém-se o espectro de absorção quando o espectro contínuo de luz passa pela matéria, onde pode atravessá-la ou ser absorvido pela mesma.

Silverstein *et al.* (2019) classificam as vibrações moleculares em deformações axiais e angulares, onde a primeira consiste em um movimento cadenciado ao longo do eixo da ligação, fazendo com que a distância interatômica oscile. As deformações angulares são variações compassadas em ligações com um átomo em comum ou o movimento de um grupo de átomos relativo ao restante da molécula sem alteração das suas posições relativas (SILVERSTEIN *et al.*, 2019). Os referidos tipos de deformação estão ilustrados na Figura 3. Os autores ainda acrescentam que as mesmas deformações envolvem alterações nos ângulos de ligação referentes a um conjunto arbitrário de coordenadas das moléculas. Além disso, Pavia *et al.* (2015) afirma que o estiramento e o dobramento são os modos vibracionais, ativos no infravermelho, mais simples que dão origem às absorções, conforme Figura 4.



Fonte: Silverstein *et al.* (2019)

Figura 4 - Modos de vibração mais simples. A) Estiramento. B) Dobramento



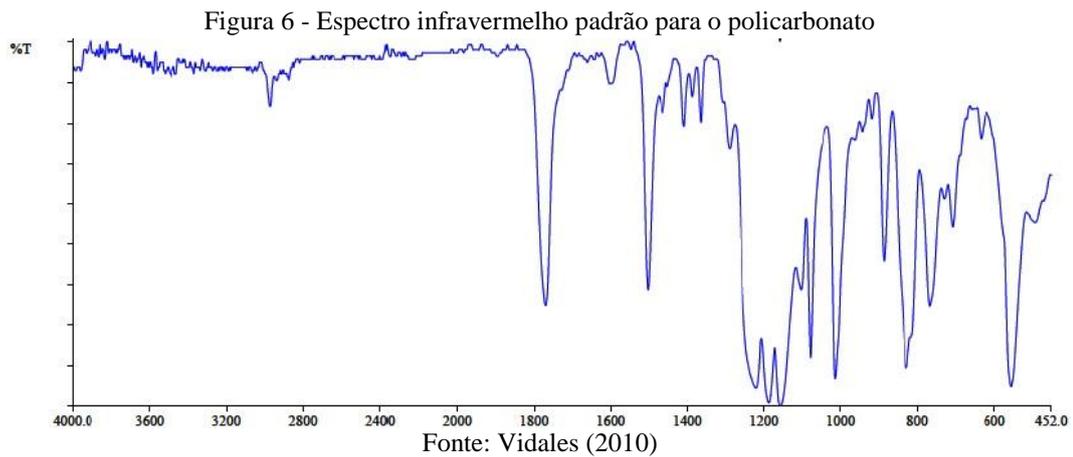
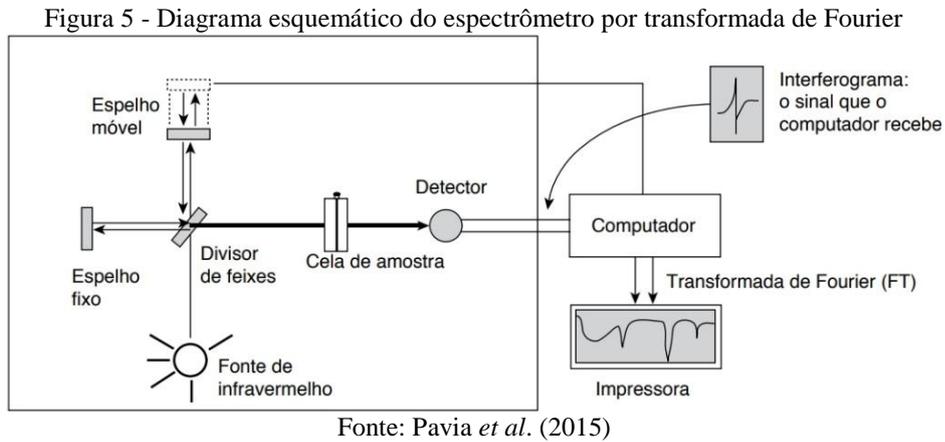
Fonte: Pavia *et al.* (2015)

O instrumento que obtém o espectro de absorção no infravermelho de uma substância é denominado espectrômetro de infravermelho ou espectrofotômetro (PAVIA *et al.*, 2015). Os mesmos complementam que são bastante utilizados dois tipos de equipamentos: instrumentos dispersivos e de transformada de Fourier (FT), ambos obtendo espectros a uma faixa entre 4.000 e 400 cm^{-1} . No primeiro, os espectros eram obtidos por um feixe de luz infravermelha que passa através da amostra, onde a radiação transmitida é dispersa em uma rede de difração, e as áreas de absorção são detectadas pela sua rotação (SILVERSTEIN *et al.*, 2019). No entanto, os autores citam que o referido método foi praticamente substituído pelo FT, devido à sua maior sensibilidade, resolução e velocidade, sendo o único método de espectroscopia usado hoje.

O funcionamento do espectrômetro FT é baseado no interferômetro de Michelson, sendo mais rápido, preciso e acessível (KAWANO, 2003). O autor descreve que tal equipamento se constitui de um divisor de feixe, um espelho fixo e outro móvel. A energia da fonte passa pelo divisor de feixes, posicionado a um ângulo de 45° , onde é separada em dois feixes perpendiculares, sendo refletidos pelos espelhos (PAVIA *et al.*, 2015). Posteriormente, os autores citam que eles se recombinaem no divisor de feixes, porém, as divergências nas extensões de onda causam interferências construtivas e destrutivas, resultando no interferograma. Metade da radiação empregada pelo equipamento origina-se do espelho fixo, transmitida pelo divisor de feixe, e metade oriunda do espelho móvel, transmitida pelo divisor de feixe (KAWANO, 2003). O autor complementa que as interferências, geradas pela recombinação dos feixes, construtivas ocorrerão se as duas radiações estiverem em fase, e as destrutivas acontecerão caso as mesmas se encontrem defasadas em 180° .

O interferômetro é, essencialmente, de um gráfico de intensidade *versus* tempo, onde uma operação matemática denominada transformada de Fourier separa as frequências das absorções individuais, produzindo um espectro idêntico ao espectrômetro dispersivo (PAVIA *et al.*, 2015). Segundo Silverstein *et al.* (2019), a transformada de Fourier em posições sucessivas do espelho gera o espectro completo de infravermelho. Na Figura 5 se encontra um

esquema do espectrômetro FT. Na Figura 6 consta o espectro de infravermelho do policarbonato, utilizado por Vidales (2010) como parâmetro para estudo de materiais de armação de óculos.

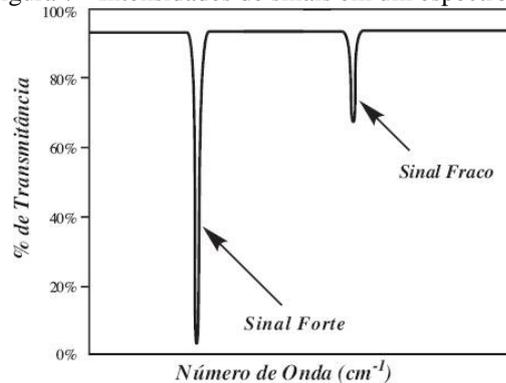


Silverstein *et al.* (2019) cita que compostos sólidos, geralmente, são analisados na forma de partículas em suspensão, de disco prensado ou como pós, e que os métodos de refletância obtiveram mais destaque em anos recentes. Os mesmos citam a refletância total atenuada (ATR) e refletância difusa por transformada de Fourier (DRIFTS) como métodos mais comuns para a realização dos ensaios nas amostras. De acordo com PAVIA *et al.* (2015) o uso do acessório ATR é o melhor método para a obtenção do espectro de um sólido pois sua técnica de amostragem elimina a preparação de amostras, provendo maior rapidez na análise. Além disso, os mesmos acrescentam que os instrumentos modernos já oferecem o referido acessório em conjunto com o módulo típico de transmitância.

3.1.4.2. Interpretação do espectro infravermelho

O espectro infravermelho (IV) do composto consiste em um gráfico de intensidade de absorção versus número de onda, onde estão registradas as posições e intensidades relativas de todas as absorções na região do infravermelho (PAVIA *et al.*, 2015). Vale salientar que, em um mesmo espectro, alguns sinais serão mais fortes em relação a outros, devido à variação na eficiência de absorção das ligações, como indicado na Figura 7 (KLEIN, 2017). Como exemplo, o autor citou o grupo carbonila (C=O) que, devido ao momento dipolar gerado pelas cargas elétricas dos seus átomos, possui maior eficácia na absorção da radiação IV comparado a ligações como C=C. Pavia *et al.* (2015) cita o pico de absorção gerado pelo grupo C=O é frequentemente o mais forte do espectro e ocorre na região 1.820-1.660 cm^{-1} . Os mesmos também comparam as ligações N-H e O-H, que possuem regiões de absorção sobrepostas, onde a primeira apresenta bandas de absorção finas e menos intensas, enquanto a segunda possui um pico de absorção largo.

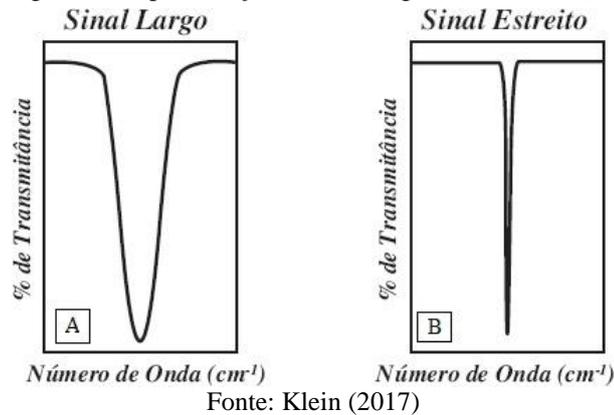
Figura 7 - Intensidades de sinais em um espectro IV



Fonte: Klein (2017)

Klein (2017) ainda acrescenta a influência da forma do sinal na análise de um espectro, podendo ser muito largos ou estreitos, conforme ilustrado na Figura 8. O autor menciona que álcoois concentrados exibem sinais de O-H largos, pois as ligações de hidrogênio se enfraquecem. Entretanto, o mesmo complementa que para álcoois diluídos, as ligações O-H não participam de uma ligação de hidrogênio, resultando em um sinal estreito. Em ácidos carboxílicos, Pavia *et al.* (2015) afirma que a presença de O-H se manifesta por estiramentos muito largos entre 3.400-2.400 cm^{-1} e normalmente se sobrepõem às absorções C-H.

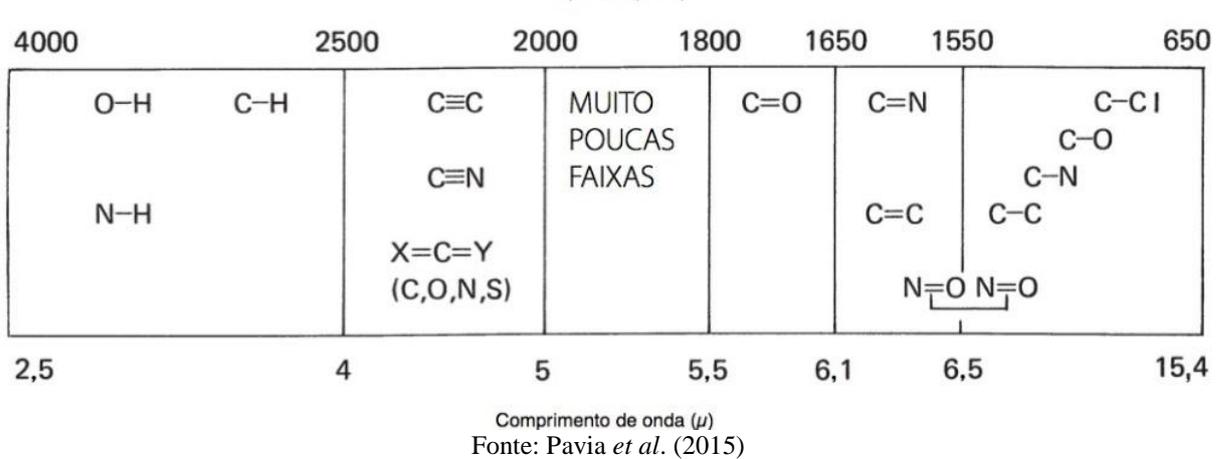
Figura 8 - Representação de sinal largo (A) e estreito (B)



Fonte: Klein (2017)

As absorções de cada tipo de ligação são identificadas em pequenas regiões do infravermelho vibracional, podendo-se definir uma faixa para cada tipo de ligação, conforme Figura 9 (PAVIA *et al.*, 2015). Silverstein *et al.* (2019) afirma que as duas áreas mais importantes para o exame preliminar são $4.000-1.300\text{ cm}^{-1}$ e $900-650\text{ cm}^{-1}$.

Figura 9 - Faixas de absorção de vários tipos comuns de ligação

Fonte: Pavia *et al.* (2015)

3.1.5. Processo de fabricação das lentes

O processo de obtenção das lentes consiste em quatro fases, sendo elas: moldagem, surfacagem, polimento e controle de qualidade.

A fase de moldagem consiste na obtenção do componente que será a matéria prima para a fase seguinte, resultando dela o bloco oftálmico ou patela (Figura 10), sendo esta última, a denominação dos blocos com uma de suas faces acabadas (RUIVINHO, 2010). O mesmo autor ainda ressalta que as propriedades dos referidos blocos dependem totalmente do material que são constituídos. Segundo Leite e Dias (2015) “as lentes dos óculos são blocos

redondos que decorrem de fábrica acabados em um único lado, partindo para o laboratório apenas trabalhar-se o outro lado do bloco ainda não concluído”. Os autores acrescentam que existem dois tipos de bloco: o Bloco de Lentes com Grau Pronto (BP), com o grau aplicado em fábrica, e Blocos de Lentes para surfacagem, onde o mesmo é realizado no próprio laboratório, mediante o exigido em receita médica.

No estágio seguinte, surfacagem, é realizado o desbaste da matéria bruta até ser atingido o grau indicado (LEITE; DIAS, 2015). A surfacagem consiste na transformação dos blocos oftálmicos em lentes (GALDINO *et al.*, 2017; SOUTHER; ZANELLA, 2017). Ruivinho (2010) ressalta que é nessa fase que serão produzidas as aparas de plástico, um dos resíduos do processo.

Figura 10 - Lente semi-acabada (patela)



Fonte: Ruivinho (2010)

Posteriormente, é realizado o polimento, com o objetivo de obter o acabamento necessário, com mais transparência e nitidez (SOUTHER; ZANELLA, 2017).

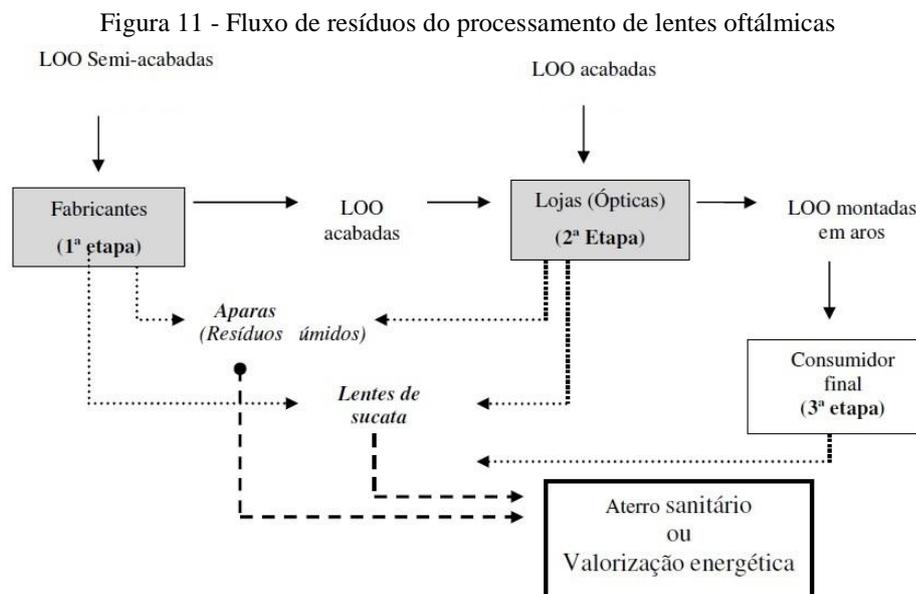
Em seguida, é realizado o controle de qualidade, que consiste na conferência dos dados da lente, conforme receita médica, por meio de um equipamento chamado lensômetro. (SOUZA; SILVA, 2019). Além disso, os autores citam que também é feita uma análise da lente, verificando-se a ocorrência de riscos ou pontos, espessuras e polimento.

Vale salientar que, após sua fabricação, as lentes podem ser revestidas por camadas superfinais denominadas “tratamento”, o qual se sabe que são utilizados óxidos metálicos em baixas concentrações, porém, todas as composições estão patenteadas, dificultando o acesso à informação detalhada (RUIVINHO, 2010).

3.1.6. Impactos Ambientais

O uso difundido de plásticos devido a sua resistência à degradação representa um grave problema ecológico, podendo demorar séculos para seu total desaparecimento (PIATTI; RODRIGUES, 2005). Por esse motivo, os resíduos dessa natureza se acumulam no ambiente (NEWEL, 2018; PIATTI; RODRIGUES, 2005). Como exemplo, cita-se o trabalho realizado por Vieira *et al.* (2011) em um manguezal na cidade de Florianópolis (SC), onde os materiais plásticos constituíam a maior fração dos resíduos encontrados no local (63%). Um estudo elaborado por Miranda e Seo (2015), com embalagens plásticas oxi-biodegradáveis e comuns, observou que a degradação de ambas não é relevante em curtos períodos. Além disso, Follman *et al.* (2017), em seu experimento realizado com sacolas plásticas dos tipos supramencionados durante um período de 12 (doze) meses, observou a não degradação por completo das mesmas. Segundo Newel (2018), os corantes e plastificantes contidos nos polímeros podem conter toxinas, como chumbo e cádmio. O autor cita que estudos atribuem 28% da contaminação por cádmio em aterros municipais aos resíduos plásticos.

Durante o ciclo de vida de uma lente oftálmica, são produzidos diversos tipos de resíduos, desde sua fabricação até seu descarte após inutilização (RUIVINHO, 2010). Na Figura 11 está esquematizado o fluxo de resíduos oriundos do processamento de lentes oftálmicas orgânicas (LOO), elaborado por Ruivinho (2010) para Portugal, porém o mesmo também retrata a realidade ocorrida no Brasil.



Fonte: Adaptado de Ruivinho (2010)

Durante o ciclo de vida das lentes, são gerados dois tipos de resíduo: as aparas, oriundas do corte das lentes, ocorrido durante o processo de surfacagem e ajuste das mesmas, nas etapas de fabricação e comercialização, respectivamente; bem como as lentes inutilizadas, oriundas de falhas durante a montagem e aquelas descartadas pós-consumo, denominadas “lentes de sucata” (RUIVINHO, 2010). Exemplos de aparas e lentes de sucata estão ilustrados na Figura 12 e Figura 13, respectivamente. Baseado no quantitativo aferido pelo autor em uma fábrica do setor, em Portugal, encontrou-se um valor médio de, aproximadamente 58g de resíduo de aparas gerado por cada unidade produzida. Considerando a quantidade produzida de 39.265.885 pares de lente no Brasil em 2018, de acordo com a pesquisa realizada pelo IBGE (BRASIL, 2021), estima-se a geração aproximada de 4.555 toneladas deste resíduo no país, para o ano supracitado.

Figura 12 - Aparas de policarbonato



Fonte: Ruivinho (2010)

Figura 13 - Lentes usadas de sucata



Fonte: Ruivinho (2010)

3.2. CONCRETO

Consiste, quando no estado plástico, em uma mistura de agregados miúdo e graúdo envolvidos por pasta de cimento e espaços cheios de ar, onde a pasta consiste em uma solução formada por água e grãos de cimento (SOBRAL, 2008). Além do cimento, água, brita e areia; também podem ser incorporados outros materiais eventuais na mistura, denominados aditivos (LIMA *et al.*, 2014). A partir da pega o concreto é considerado como um sólido, sendo um material em perpétua evolução, sensível a modificações nas condições ambientais, físicas, químicas e mecânicas, com reações comumente lentas (OLIVEIRA, 2008b). Lima *et al.* (2014) afirma que o concreto é um material que apresenta dureza semelhante às rochas naturais quando endurecido, sendo um composto plástico no estado fresco, possibilitando sua modelagem em formas e tamanhos variados.

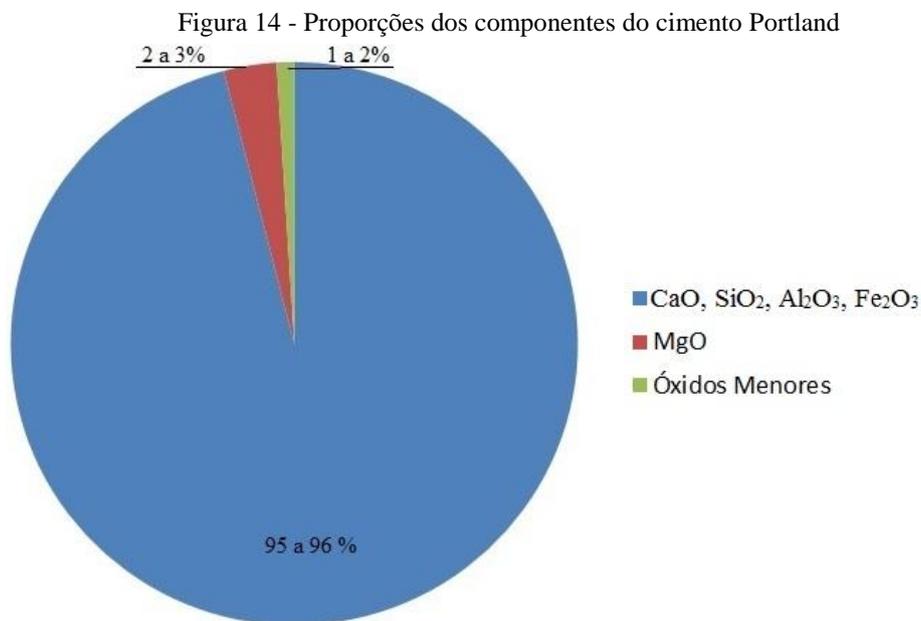
Trata-se de um material de construção amplamente difundido, encontrado em casas de alvenaria, rodovias, pontes, edifícios, entre outros empreendimentos (PEDROSO, 2009). O mesmo autor ainda afirma que no Brasil são produzidos anualmente cerca de 30 milhões de metros cúbicos de concreto em centrais dosadoras. De acordo com a ANEPAC (2011), o consumo de concreto no mundo perde apenas para o da água, sendo considerado o segundo insumo mais consumido no mundo.

3.2.1. Cimento Portland

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002) define o cimento Portland como um pó fino, de características aglomerantes, que endurece com a ação da água, não se decompondo posteriormente. O autor ainda afirma que o cimento é o componente mais ativo quimicamente dos concretos e argamassas, sendo ele o responsável pela transformação da mistura de materiais no produto final desejado. O mesmo ainda ressalta a importância do conhecimento de suas características e propriedades, de modo a aplica-las da melhor maneira possível.

Segundo Oliveira (2008a), o cimento Portland é obtido pela trituração do clínquer constituído fundamentalmente por silicatos hidráulicos de cálcio, uma determinada fração de sulfato de cálcio natural, além de eventuais adições de certas substâncias para a modificar certas propriedades ou facilitar seu emprego. O referido autor afirma que os componentes básicos do cimento Portland são cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), determinada fração de magnésia (MgO), além de uma pequena quantidade de

anidrido sulfúrico (SO_3), além de constituintes menores como impurezas, óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), óxido de titânio (TiO_2), entre outras substâncias de menor importância. As proporções constituintes do cimento mencionadas pelo autor estão indicadas na Figura 14. Neville (2016) apresentam tais proporções detalhadamente, conforme indicado na Tabela 3. De acordo com a ABCP (2002), o clínquer é composto por calcário e argila, obtidos em jazidas próximas às fábricas de cimento, possuindo a peculiaridade, depois de triturado, de desenvolver uma reação química na presença de água, que resulta na formação dos produtos de hidratação do clínquer, e conseqüentemente no seu endurecimento, adquirindo resistência e durabilidade.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008a)

Tabela 3- Limites usuais na composição do cimento Portland

| Óxido | Teor (%) |
|----------------------------------|----------|
| CaO | 60-67 |
| SiO ₂ | 17-25 |
| Al ₂ O ₃ | 3-8 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,5-6,0 |
| MgO | 0,5-4,0 |
| Álcalis (como Na ₂ O) | 0,3-1,2 |
| SO ₃ | 2,0-3,5 |

Fonte: Neville (2016)

A produção do clínquer consiste na realização da calcinação do calcário e da argila, durante a aplicação do calor até a temperatura de fusão incipiente, onde ocorrem combinações

químicas, pelas quais se formam os compostos (fases do clínquer) indicados na Tabela 4 (OLIVEIRA, 2008a; NEVILLE, 2016). Neville (2016) esclarece que na química do cimento Portland os compostos seguem uma nomenclatura própria, onde: $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$, além da água (H_2O) no cimento hidratado, representada como H, e do anidrido sulfúrico (SO_3), representado como $\bar{\text{S}}$. As frações típicas dos compostos na composição do cimento Portland, após calcinação, se encontram na Tabela 5, conforme Gambhir (2013).

Tabela 4 - Principais compostos do cimento Portland

| Nome do composto | Composição em óxidos | Abreviatura |
|-----------------------------|---|-----------------------|
| Silicato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_3S |
| Silicato dicálcico | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_2S |
| Aluminato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A |
| Ferroaluminato tetracálcico | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF |

Fonte: Neville (2016)

Tabela 5 – Proporção típica dos compostos do cimento Portland após calcinação

| Composto | Percentual em massa de cimento |
|-----------------------|--------------------------------|
| C_3S | 25-50 |
| C_2S | 20-45 |
| C_3A | 5-12 |
| C_4AF | 6-12 |

Fonte: Gambhir (2013)

Segundo Oliveira (2008a) o composto de maior influência na resistência do cimento, em todas as idades é o silicato tricálcico (C_3S), enquanto o silicato dicálcico (C_2S) torna-se mais relevante no seu ganho de resistência em idades avançadas, após um ano ou mais, enquanto o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) não possui influência alguma. O autor ainda cita que o aluminato tricálcico (C_3A) também contribui para o aumento da resistência, especialmente no primeiro dia, sendo também um dos compostos mais relevantes para o calor de hidratação, sobretudo no período inicial de cura, além de ser o responsável pela rapidez da pega, quando presente em forma cristalina. O mesmo complementa que o silicato tricálcico (C_3S) também é responsável pelo calor de hidratação em idade inicial, além de ser o segundo componente responsável pelo tempo de pega. Gambhir (2013) ressalta que uma maior proporção de silicato tricálcico (C_3S) ocasiona um endurecimento rápido com ganho inicial de resistência e maior calor de hidratação, ao contrário do silicato dicálcico (C_2S), que resulta no endurecimento mais lento com menor calor de hidratação, no entanto, o mesmo fornece uma maior resistência ao ataque químico. A Tabela 6 apresenta o calor de hidratação de cada

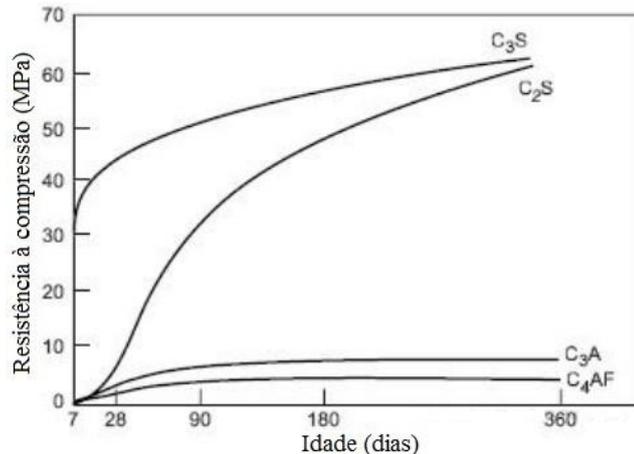
composto do cimento, enquanto a Figura 15 mostra a contribuição de cada composto no ganho de resistência à compressão. Vale salientar que o tempo de hidratação é controlado através da incorporação de gesso, em proporção conveniente (OLIVEIRA, 2008a). Jahagirdar, Patki e Metan (2019) ainda ressaltam que o óxido de cálcio (CaO) é o principal composto para o ganho de resistência do cimento, tal fato é observado devido ao mesmo estar presente em todos os compostos que influenciam nessa característica.

Tabela 6 - Calor de hidratação dos compostos do cimento

| Componente | Calor de hidratação (cal / g) |
|-------------------|-------------------------------|
| C ₃ S | 120 |
| C ₂ S | 62 |
| C ₃ A | 207 |
| C ₄ AF | 100 |

Fonte: Adaptado de Oliveira (2008a)

Figura 15 - Contribuição dos compostos para o ganho de resistência à compressão do cimento



Fonte: Gambhir (2013)

Os cimentos foram inicialmente fabricados com características determinadas pelos consumidores, tendo a indústria se limitado a produzir certos tipos de cimento após a introdução das primeiras especificações (OLIVEIRA, 2008a). No Brasil, o primeiro cimento Portland inserido no mercado corresponde atualmente ao CP I, sem qualquer adição além do gesso (ABCP, 2002). Atualmente, os tipos de cimento Portland disponíveis no mercado nacional são especificados pela NBR 16.697 (ABNT, 2018c), indicados na Tabela 7.

Tabela 7 - Tipos de cimento Portland segundo NBR 16.697

| Designação normatizada (tipo) | Subtipo | Sigla | Classe de resistência | Sufixo |
|--|-------------------------------------|---------|---------------------------|--|
| Cimento Portland comum | Sem adição | CP I | | |
| | Com adição | CP I-S | | |
| Cimento Portland composto | Com escória granulada de alto-forno | CP II-E | 25, 32 ou 40 ^c | RS ^a ou BC ^b |
| | Com material carbonático | CP II-F | | |
| | Com material pozzolânico | CP II-Z | | |
| Cimento Portland de alto-forno | | CP III | | |
| Cimento Portland pozzolânico | | CP IV | | |
| Cimento Portland de alta resistência inicial | | CP V | ARI ^d | |
| Cimento Portland branco | Estrutural | CPB | 25, 32 ou 40 ^c | |
| | Não estrutural | CPB | - | - |

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos.
^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação.
^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias, em megapascals (MPa)
^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que representa a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa.

Fonte: ABNT (2018c)

O cimento Portland composto possui uma composição intermediária entre o cimento Portland comum e o cimento Portland com adições, referentes ao cimento de alto-forno e pozzolânico (ABCP, 2002). Em 2018, o mesmo representou em torno de 66% do consumo total de cimento Portland no país, de acordo com dados analisados do IBGE (BRASIL, 2021), conforme indicado no gráfico da Figura 16. Um relatório elaborado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013), divulgou o consumo de cimento por tipo entre os anos de 2008 e 2013, mostrando um consumo mais elevado de CP II todo o período, com um percentual mínimo de 57,78% em 2012 e 66,98% em 2009. Os dados referentes à quantidade produzida e ao percentual anual se encontram na Tabela 8 e na Tabela 9, respectivamente.

Tabela 8 - Produção anual de cimento Portland segundo os tipos (1.000 toneladas)

| Ano | Tipos de cimento | | | | | | Ajustes | Total |
|------|------------------|--------|--------|-------|-------|--------------|---------|--------|
| | CP I | CP II | CP III | CP IV | CP V | Branco/White | | |
| 2008 | 346 | 33.080 | 8.879 | 5.714 | 3.577 | 86 | 288 | 51.970 |
| 2009 | 84 | 34.662 | 7.967 | 5.097 | 3.377 | - | 560 | 51.747 |
| 2010 | 88 | 38.474 | 8.345 | 6.686 | 4.211 | - | 1.313 | 59.117 |
| 2011 | 103 | 38.659 | 9.347 | 8.247 | 4.973 | - | 2.764 | 64.093 |
| 2012 | 98 | 39.743 | 10.000 | 9.612 | 5.580 | - | 3.776 | 68.809 |
| 2013 | 263 | 41.249 | 9.405 | 9.863 | 5.660 | - | 3.721 | 70.161 |

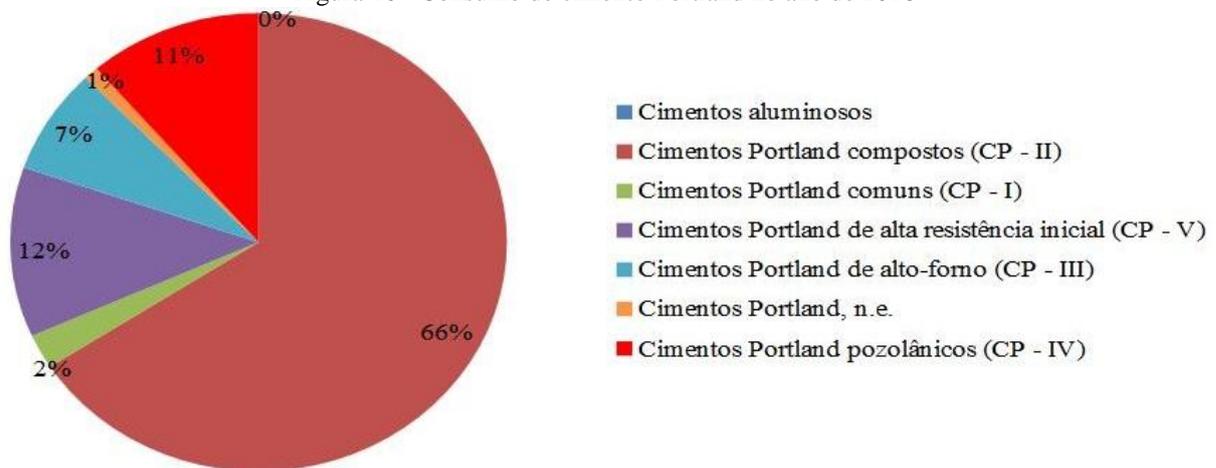
Fonte: adaptado de SNIC (2013)

Tabela 9 - Percentual anual produzido de cimento Portland segundo os tipos

| Ano | Tipos de cimento | | | | | | Ajustes | Total |
|------|------------------|--------|--------|--------|-------|--------------|---------|-------|
| | CP I | CP II | CP III | CP IV | CP V | Branco/White | | |
| 2008 | 0,67% | 63,65% | 17,08% | 10,99% | 6,88% | 0,17% | 0,55% | 100% |
| 2009 | 0,16% | 66,98% | 15,40% | 9,85% | 6,53% | 0,00% | 1,08% | 100% |
| 2010 | 0,15% | 65,08% | 14,12% | 11,31% | 7,12% | 0,00% | 2,22% | 100% |
| 2011 | 0,16% | 60,32% | 14,58% | 12,87% | 7,76% | 0,00% | 4,31% | 100% |
| 2012 | 0,14% | 57,76% | 14,53% | 13,97% | 8,11% | 0,00% | 5,49% | 100% |
| 2013 | 0,37% | 58,79% | 13,40% | 14,06% | 8,07% | 0,00% | 5,30% | 100% |

Fonte: adaptado de SNIC (2013)

Figura 16 - Consumo de cimento Portland no ano de 2018



Fonte: Brasil (2021)

A influência dos tipos de cimento nas propriedades de argamassas e concretos e se encontram resumidas na Tabela 10, conforme publicado pela ABCP (2002). A mesma ainda afirma que o efeito de tais propriedades pode ser acentuado através da variação na quantidade dos componentes do concreto, além das suas características.

Tabela 10 - Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos

(Continua)

| Propriedades | Tipo de cimento Portland | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|---|---|--------------------------------|--------|----------------|---|
| | CP I e CP II | CP III | CP IV | CP V | RS | CPB Estrutural | BC |
| Resistência à compressão | Padrão | Menor nos primeiros dias e maior no final da cura | Menor nos primeiros dias e maior no final da cura | Muito maior nos primeiros dias | Padrão | Padrão | Menor nos primeiros dias e maior no final da cura |

Tabela 10 - Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos

(Conclusão)

| Propriedades | Tipo de cimento Portland | | | | | | |
|---|--------------------------|--------|-------|--------|--------|-------------------|--------|
| | CP I e CP II | CP III | CP IV | CP V | RS | CPB Estrutural | BC |
| Calor gerado na reação do cimento com a água | Padrão | Menor | Menor | Maior | Padrão | Maior | Menor |
| Impermeabilidade | Padrão | Maior | Maior | Padrão | Padrão | Padrão | Padrão |
| Resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgotos) | Padrão | Maior | Maior | Menor | Maior | Menor | Maior |
| Durabilidade | Padrão | Maior | Maior | Padrão | Maior | Padrão | Maior |

Fonte: ABCP (2002)

A ABCP (2002) ainda cita que apesar da necessidade de realização estudos de dosagem adequados, a análise das propriedades do cimento e sua influência em argamassas e concretos já demonstram que determinados tipos são mais apropriados que outros para certas finalidades, conforme indicado na Tabela 11.

Tabela 11 - Aplicações de diferentes tipos de cimento Portland

(Continua)

| Aplicação | Tipos de cimento Portland |
|---|---|
| Argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e bloco | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV) |
| Argamassa de assentamento de azulejos e ladrilhos | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) e Pozolânico (CP IV) |
| Argamassa de rejuntamento de azulejos e ladrilhos | Branco (CPB) |
| Concreto simples (sem armadura) | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV) |
| Concreto magro (para passeios e enchimentos) | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV) |

Tabela 11 - Aplicações de diferentes tipos de cimento Portland

(Continuação)

| Aplicação | Tipos de cimento Portland |
|---|---|
| Concreto armado com função estrutural | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Concreto protendido com protensão das barras antes do lançamento do concreto | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-Z, CP II-F), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Concreto protendido com protensão das barras após o endurecimento do concreto | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Concreto armado para desforma rápida, curado por aspersão de água ou produto químico | de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Concreto armado para desforma rápida, curado a vapor ou com outro tipo de cura térmica | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento curados por aspersão de água | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento para desforma rápida, curados por aspersão de água | de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento para desforma rápida, curados a vapor ou com outro tipo de cura térmica | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Pavimento de concreto simples ou armado | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV) |
| Pisos industriais de concreto | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) |

Tabela 11 - Aplicações de diferentes tipos de cimento Portland

| Aplicação | Tipos de cimento Portland |
|---|---|
| Concreto arquitetônico | Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Argamassa armada | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural) |
| Solo-Cimento | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV) |
| Argamassas e concretos para meios agressivos (água do mar e de esgotos) | de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Resistente a Sulfatos |
| Concreto-massa | de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e de Baixo Calor de Hidratação |
| Concreto com agregados reativos | Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV) |

Fonte: ABCP (2002)

No entanto, Lermen et al. (2019) realizou um estudo comparativo de três tipos de cimento, sendo eles CPII-Z, CPII-F e CPV-ARI, em concretos produzidos com resíduos de construção. Vale salientar que a resistência característica à compressão, informada pelos autores, aos 28 dias, dos cimentos empregados no trabalho foram de 42MPa para o CPII-Z e CPII-F, e 53,6MPa para o CPV-ARI. A relação água/cimento empregada foi 0,45. A referida pesquisa mostrou que os concretos com o CPII-Z apresentaram um desempenho superior na resistência à compressão aos 28 dias, densidades seca e úmida, bem como a absorção de água, seguido do CPV-ARI e do CPII-F, respectivamente.

Coimbra, Libardi e Morelli (2006) compararam as deformações por fluência e resistências à compressão aos 28 dias de concretos produzidos com cimento Portland CPII-Z e CPII-E, ambos classe 32. Os autores encontraram uma resistência à compressão do concreto com CPII-E discretamente superior, entretanto, seus resultados mostraram-se mais dispersos, com um desvio padrão de 5,23 MPa, contra 2,19 MPa do CPII-Z. Quanto à deformação por fluência, estes não identificaram diferenças relevantes, apesar do concreto com CPII-Z apresentar um valor pouco menor. Por fim, os autores afirmaram que o cimento tipo Z seria uma melhor alternativa para aplicações de concreto com baixa deformabilidade.

3.2.2. Agregados

Albuquerque (2008) define o agregado como: “material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos”. Segundo Lima, Barbosa e Gomes (2002), os mesmos preenchem um maior volume no concreto e influem nas suas propriedades, nos estados fresco e endurecido, e que são importantes na diminuição do custo do concreto pois são mais baratos que o cimento. Gambhir (2013) afirma que eles conferem maior estabilidade de volume e durabilidade ao concreto. Neville (2016) afirma que os mesmos podem limitar a resistência do concreto, caso possuam propriedades indesejáveis. O autor ainda afirma que como os agregados são mais baratos que o cimento, é econômico seu uso na maior quantidade possível. No entanto, Gambhir (2013) ressalta que os agregados devem atender a determinadas características para se obter um concreto trabalhável, resistente, durável e econômico.

No concreto, as dimensões máximas dos agregados podem variar de dezenas e menos que um décimo de milímetro, sendo incorporadas na sua mistura partículas de diferentes tamanhos (NEVILLE, 2016). O mesmo autor denomina de granulometria a distribuição das dimensões das partículas. A composição granulométrica também indica a quantidade da mistura seca, determinando a necessidade de argamassa para certa trabalhabilidade (RECENA, 2017). Os agregados podem ser encontrados com tamanho reduzido naturalmente, como areia, pedregulho ou cascalho, bem como podem ser produzidos via processos de britagem (ALBUQUERQUE, 2008; NEVILLE, 2016).

Segundo Albuquerque (2008), para caracterizar um agregado necessita-se saber as parcelas de massa dos grãos de cada diâmetro em relação à massa total do mesmo, sendo as faixas de tamanho divididas por peneiramento. O ensaio pode ser realizado manualmente ou com agitadores mecânicos (GRUBBA, 2016). A NBR NM 248 (ABNT, 2001), que padroniza o ensaio de peneiramento no Brasil, considera o agitador mecânico como um item facultativo entre a aparelhagem necessária. As aberturas das peneiras utilizadas no ensaio de peneiramento se encontram na Tabela 12, conforme NBR 7211 (ABNT, 2009c) e NBR NM 248 (ABNT, 2001).

Tabela 12 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal)

| Série Normal | Série Intermediária |
|-------------------|---------------------|
| 75 mm | - |
| - | 63 mm |
| - | 50 mm |
| 37,5 mm | - |
| - | 31,5 mm |
| - | 25 mm |
| 19 mm | - |
| - | 12,5 mm |
| 9,5 mm | - |
| - | 6,3 mm |
| 4,75 mm | - |
| 2,36 mm | - |
| 1,18 mm | - |
| 600 μm | - |
| 300 μm | - |
| 150 μm | - |

Fonte: ABNT (2001, 2009c)

Após a realização do peneiramento, a avaliação granulométrica é realizada pesando-se a fração total retida em cada peneira e calculando o seu percentual em relação à massa total do agregado, podendo também determinar a porcentagem retida acumulada e a que passa por cada peneira (GRUBBA, 2016). A Figura 17 exemplifica a separação dos diferentes diâmetros de uma amostra de agregado miúdo por peneiramento.

Figura 17 - Separação granulométrica de amostra de areia



Fonte: Grubba (2016)

Quanto ao tamanho, os agregados podem ser classificados em miúdos e graúdos (ALBUQUERQUE, 2008; GAMBHIR, 2013; NEVILLE, 2016). De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009c) são classificados como miúdos àqueles cujos grãos passam pela peneira com

abertura de malha 4,75 mm; sendo os grãos àqueles que passam pela malha de 75 mm ficando retidos na abertura de 4,75 mm. As areias podem ser classificadas de acordo com a sua dimensão, conforme Albuquerque (2008) e Luz e Almeida (2012), em fina, média e grossa. Na Tabela 13 se encontram os parâmetros considerados por ambos os autores.

Tabela 13 - Classificação das areias segundo o tamanho

| Classificação | Dimensão | |
|---------------|--------------------|----------------------|
| | Albuquerque (2008) | Luz e Almeida (2012) |
| Areia Fina | 0,15-0,60mm | 0,075-0,42mm |
| Areia Média | 0,60-2,40mm | 0,42-1,20mm |
| Areia Grossa | 2,40-4,80mm | 1,20-2,00mm |

Fonte: Albuquerque (2008) e Luz e Almeida (2012)

Recena (2017) afirma que são obtidos dois parâmetros a partir da análise granulométrica dos agregados, o módulo de finura e a dimensão máxima característica.

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009c), a dimensão máxima característica consiste na abertura nominal da malha da peneira, em milímetros, onde o percentual retido acumulado se encontra igual ou abaixo de 5% em massa. São consideradas as aberturas nominais da série normal ou intermediária para tal parâmetro, de acordo com a referida norma.

De acordo com Recena (2017) o parâmetro definido anteriormente determina a dimensão do grão que identifica o agregado, fornecendo dados para a restrição de sua aplicação em função das dimensões da peça ou da densidade e distribuição das armaduras. Neville (2016) ainda ressalta que uma maior dimensão máxima implicará em uma quantidade menor de água para amassamento, concluindo que para uma certa trabalhabilidade e um determinado consumo de cimento, pode-se reduzir a relação água/cimento, com conseqüente crescimento da resistência. Gambhir (2013) ainda complementa que o emprego de um agregado com maior dimensão também reduzirá o calor de hidratação, as tensões térmicas correspondentes e as fissuras de retração.

Segundo Albuquerque (2008), o módulo de finura é um parâmetro ainda em uso para a areia na dosagem experimental do concreto, cuja curvas granulométricas do agregado apresentam analogia de forma. A NBR 7211 (ABNT, 2009c) define o módulo de finura como: “soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100”. O mesmo fornece uma ideia da finura do material (RECENA, 2017). Neville (2016) afirma que o módulo de finura pode ser entendido como a dimensão

média ponderada da peneira na qual o material ficou retido, considerando-se a partir da mais fina. O autor ainda complementa que o módulo de finura não pode empregado como parâmetro da graduação de um agregado, sendo aplicável em pequenas variações em agregados de uma mesma origem. O valor do referido parâmetro decresce à medida que o agregado se torna mais fino (ALBUQUERQUE, 2008). De acordo com Gambhir (2013), o módulo de finura varia de 2,00 a 3,50 para agregados miúdos, e de 5,50 a 8,00 para agregados graúdos. Na Tabela 14 estão os módulos de finura de acordo com o tamanho da areia, segundo Luz e Almeida (2012).

Tabela 14 - Módulos de finura segundo tamanho da areia

| Classificação | Módulo de Finura |
|------------------|------------------|
| Areia Muito Fina | - |
| Areia Fina | < 2,40 |
| Areia Média | 2,40-3,90 |
| Areia Grossa | > 3,90 |

Fonte: Luz e Almeida (2012)

A NBR 7211 (ABNT, 2009c) estabelece limites para a composição granulométrica dos agregados miúdos, constantes na Tabela 15.

Tabela 15 - Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo

| Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1) | Porcentagem, em massa, retida acumulada | | | |
|---|---|------------|--------------------|-----------------|
| | Limites inferiores | | Limites superiores | |
| | Zona utilizável | Zona ótima | Zona ótima | Zona utilizável |
| 9,5 mm | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6,3 mm | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4,75 mm | 0 | 0 | 5 | 10 |
| 2,36 mm | 0 | 10 | 20 | 25 |
| 1,18 mm | 5 | 30 | 30 | 50 |
| 600 µm | 15 | 35 | 55 | 70 |
| 300 µm | 50 | 65 | 85 | 95 |
| 150 µm | 85 | 90 | 95 | 100 |

Fonte: ABNT (2009c)

A referida norma ainda menciona que o módulo de finura na zona ótima varia entre 2,20 e 2,90, enquanto na zona utilizável inferior tal valor se encontra entre 1,55 e 2,20, e na zona utilizável superior, 2,90 a 3,50.

Quanto ao agregado graúdo, Fusco (2008) afirma que comercialmente, a brita é classificada em seis categorias distintas, em função de uma faixa de tamanhos e do diâmetro

máximo característico, indicadas na Tabela 16.

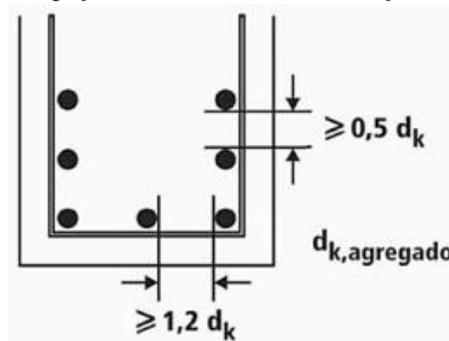
Tabela 16 - Classificação das britas de acordo com a dimensão

| Categoria | Dimensões (mm) | Máximo diâmetro característico (mm) |
|-----------|----------------|-------------------------------------|
| Brita 0 | 4,8-9,5 | 9,5 |
| Brita 1 | 9,5-19 | 19 |
| Brita 2 | 19-25 | 25 |
| Brita 3 | 25-50 | 50 |
| Brita 4 | 50-76 | 76 |
| Brita 5 | 76-100 | 100 |

Fonte: Fusco (2008)

O autor supracitado acrescenta que em concretos mais resistentes deve-se elevar a compactidade da mistura, fazendo-se necessário o aumento da quantidade de diâmetros menores. O mesmo ainda ressalta que a dimensão característica do agregado graúdo restringe o espaçamento entre as barras de aço das armaduras, também sendo limitado pela espessura das peças estruturais. Como exemplo, o autor cita o espaçamento entre barras na armadura de uma viga que, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), deve ser o maior entre: 20mm, o diâmetro da barra, feixe ou luva, bem como $1,2d_k$ para distribuição horizontal, e $0,5d_k$ para distribuição vertical, onde d_k corresponde ao diâmetro máximo do agregado graúdo. Tais parâmetros se encontram indicados na Figura 18. Por sua vez, a referida norma estabelece que a dimensão máxima característica do agregado graúdo não pode exceder em 20% a espessura nominal do cobrimento do concreto na peça estrutural.

Figura 18 - Limites para espaçamento entre barras em função da dimensão do agregado



Fonte: Fusco (2008)

Os limites para a composição granulométrica dos agregados graúdos definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009c) se encontram na Tabela 17, onde “d” e “D” correspondem à menor e maior dimensão do agregado, respectivamente.

Tabela 17 - Limites de distribuição granulométrica do agregado graúdo

| Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1) | Porcentagem, em massa, retida acumulada | | | | |
|---|---|----------------------------------|---------------------|--------|---------|
| | Zona granulométrica | | | | |
| | d/D ^a | | | | |
| | 4,75/12,5 | 9,5/25 | 19/31,5 | 25/50 | 37,5/75 |
| 75 mm | - | - | - | - | 0-5 |
| 63 mm | - | - | - | - | 5-30 |
| 50 mm | - | - | - | 0-5 | 75-100 |
| 37,5 mm | - | - | - | 5-30 | 90-100 |
| 31,5 mm | - | - | 0-5 | 75-100 | 95-100 |
| 25 mm | - | 0-5 | 5-25 ^b | 87-100 | - |
| 19 mm | - | 2-15 ^b | 65 ^b -95 | 95-100 | - |
| 12,5 mm | 0-5 | 40 ^b -65 ^b | 92-100 | - | - |
| 9,5 mm | 2-15 ^b | 80 ^b -100 | 95-100 | - | - |
| 6,3 mm | 40 ^b -65 ^b | 92-100 | - | - | - |
| 4,75 mm | 80 ^b -100 | 95-100 | - | - | - |
| 2,36 mm | 95-100 | - | - | - | - |

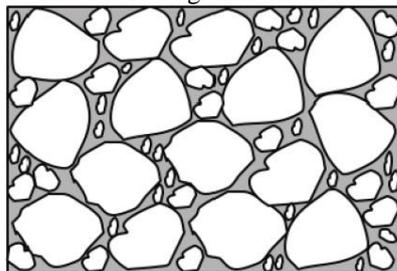
^a Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

^b Em cada zona granulométrica, deve ser aceita uma variação máxima de 5% em apenas um dos limites marcados com 2), podendo estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: ABNT (2009c)

Vale salientar que o emprego de agregados mal graduados na confecção de concreto ocasiona a necessidade de um maior consumo de cimento, resultando no encarecimento do produto (GRUBBA, 2016). A Figura 19 representa um agregado bem graduado, segundo Grubba (2016), onde a parte cinza retrata a pasta de cimento e a parte branca representa os agregados. Além da trabalhabilidade do concreto, a granulometria dos agregados possui um papel importante no adensamento da mistura, que influencia diretamente na obtenção da resistência característica à compressão a uma determinada relação água/cimento (NEVILLE, 2016). O autor ainda acrescenta ser essencial evitar a segregação, sendo fundamental que os vazios das misturas dos agregados sejam suficientemente reduzidos de modo a não permitir a passagem da pasta de cimento fresca entre os mesmos, separando-se.

Figura 19 - Influência da granulometria dos agregados



Fonte: Grubba (2016)

Quanto a sua massa, Albuquerque (2008) classifica os agregados em leves, médios e pesados. O mesmo relacionou alguns tipos distintos de agregados, onde foram considerados leves àqueles com densidade aparente média entre 0,3 e 1,0, os médios possuem valor entre 1,4 e 1,7, e os pesados com a faixa de variação entre 2,9 e 3,3. Mehta e Monteiro (1994) definem agregado leve aquele com massa unitária inferior a 1120 kg/m^3 , e relacionam diversos agregados pesados com massa unitária típica variando entre 2240 kg/m^3 e 4480 kg/m^3 . A NBR 9935 (ABNT, 2011b) considera como agregado de densidade normal aquele cuja densidade se encontra entre 2000 kg/m^3 e 3000 kg/m^3 . A mesma denomina de agregado leve aquele de baixa densidade, citando argila, escória e vermiculita como alguns exemplos, e agregado pesado ou denso como aquele de elevada densidade, mencionando alguns exemplos como barita e hematita. No entanto, a NBR NM 35 (ABNT, 1995) estabelece um limite entre 880 kg/m^3 e 1040 kg/m^3 para o agregado leve, em função de sua granulometria.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), para a dosagem de concretos são necessárias: a determinação da massa específica, que consiste na massa de material pelo volume, incluindo-se os poros internos das partículas; e da massa unitária, definida como a massa das partículas por unidade de volume, considerando-se os vazios entre as mesmas. A massa específica supracitada, de acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2011b), é denominada de densidade de partículas, onde pode ocorrer na condição seca e saturada superfície seca. A referida norma ainda denomina a massa unitária de densidade aparente do agregado, complementando que tal parâmetro pode variar de acordo com a umidade e compactidade do material no recipiente. A mesma ainda define a densidade real das partículas, na condição seca, como a massa do agregado pelo volume das partículas, desconsiderando os poros permeáveis e os vazios entre os grãos. No entanto Mehta e Monteiro (1994) afirmam ser desnecessária a determinação de tal característica para fins de dosagem de concreto. A NBR 7211 (ABNT, 2009c) considera os parâmetros de massa específica e massa unitária como específicos, deixando a realização dos ensaios a critério do consumidor. Os ensaios de massa específica são padronizados pela NBR 52 (ABNT, 2009) para agregados miúdos e pela NBR NM 53 (ABNT, 2009b) para agregados graúdos; enquanto a determinação da massa unitária é normatizada pela NBR NM 45 (ABNT, 2006a).

Quanto a influência dos agregados em concretos, o estudo realizado por Sartorti *et al.* (2019) observou um desempenho insuficiente na resistência à compressão de concretos confeccionados com areia muito fina e muito grossa, tendo sido satisfatório o uso de areias

cuja granulometria se encaixa na zona ótima determinada pela NBR 7211 (ABNT, 2009c). A referida pesquisa também constatou um decréscimo na trabalhabilidade, expressa pelo ensaio de abatimento, quanto menor o módulo de finura e maior o teor de finos do agregado.

Silva *et al.* (2016) realizou uma pesquisa com três traços com pó de pedra, todos com as dimensões de 125 μ m, 600 μ m e 1,18mm, em distintas proporções. A mesma verificou resultados de resistência à compressão superiores mediante uso do agregado melhor graduado, favorecido pelo maior preenchimento de vazios, no entanto observou-se uma diferença mínima entre os diferentes traços empregados no experimento. Quanto à determinação da consistência, os autores não encontraram variação significativa no ensaio de abatimento de tronco de cone.

Vilane e Sabelo (2016) estudaram o efeito dos agregados graúdos nas propriedades do concreto, com as dimensões 9,5mm, 13,2mm e 19mm. Observou-se que tanto a trabalhabilidade, avaliada pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), quanto à resistência à compressão foram diretamente proporcionais ao crescimento da dimensão máxima característica. Vale salientar que foi empregada uma relação água/cimento de 0,50.

Rohden (2011) afirma que a dimensão máxima característica do agregado influencia diretamente na resistência à compressão do concreto, com uma maior relevância em concretos produzidos com menor consumo de água. O mesmo analisou concretos produzidos com consumo de água de 115 l/m³, 130 l/m³, 145 l/m³, 160 l/m³ e 200 l/m³, com relações água/cimento fixas, para os quais foram moldados corpos de prova com agregados de distintas dimensões características, cada um. O autor encontrou relações inversamente proporcionais entre a dimensão máxima característica e a resistência à compressão, onde a variação se mostra mais acentuada em concretos com menor consumo de água.

Quanto à resistência à tração dos concretos, Elices e Rocco (2008) relataram em sua pesquisa uma tendência de redução relacionada ao aumento do diâmetro do agregado graúdo. Os autores utilizaram agregados de diâmetros 3mm, 9mm e 14mm na produção dos concretos para a realização dos ensaios, que foram produzidos em dois traços distintos com relação água/cimento fixas em 0,42 e 0,70.

3.2.3. Dosagem

Um concreto com diferentes qualidades pode ser obtido utilizando seus componentes, cimento, água, agregados miúdos e graúdos, além das adições minerais, em diferentes

proporções, podendo ser empregados constituintes de características variadas de modo a produzirem-se concretos com parâmetros aceitáveis (GAMBHIR, 2013).

Entende-se por estudo de dosagem a metodologia fundamental para se obter a proporção adequada dos materiais constituintes do concreto, também denominado traço (TUTIKIAN; HELENE, 2011). A dosagem tem por objetivo a obtenção de um material que possua os requisitos preestabelecidos, também devendo ser considerados os custos dos materiais disponíveis e os possíveis de aquisição (RICCI; PEREIRA; AKASAKI, 2017). Os autores ainda destacam a dificuldade para se obter uma combinação mais econômica e que cumpra as exigências de desempenho determinadas em projeto, pois a alteração de um único componente influencia na proporção dos demais materiais.

Ahmed *et al.* (2016) cita alguns fatores que influenciam no traço do concreto como o peso específico dos materiais, tipo e resistência do cimento, além do seu teor, relação água/cimento, relação agregado/cimento, forma e tamanho dos agregados, entre outros. O autor ainda afirma que muitas dessas características estão interrelacionadas, e que um concreto de boa qualidade deverá atender a propriedades como resistência, durabilidade e trabalhabilidade.

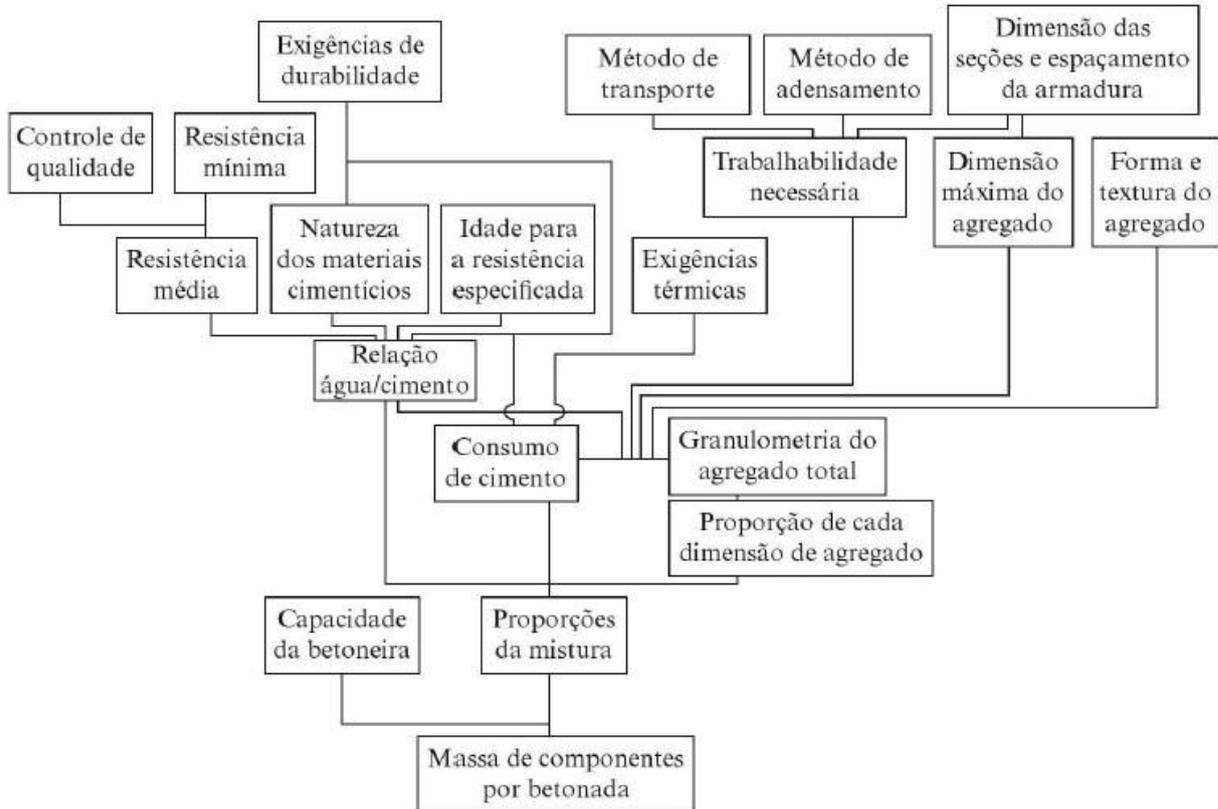
Helene e Terzian (1992) mencionam a resistência à compressão como o parâmetro principal empregado na dosagem e controle de qualidade de concreto em obras correntes. Segundo Neville (2016), o projeto estrutural atribui dois parâmetros a serem considerados na dosagem, sendo eles a resistência e durabilidade do concreto, devendo a trabalhabilidade ser adequada às condições de lançamento. O autor ainda cita que a trabalhabilidade não deve ser restrita apenas ao abatimento no momento de descarga da betoneira, mas também às suas perdas durante a concretagem. Sendo assim, o mesmo complementa que a definição do abatimento está condicionada à análise dos procedimentos de execução do serviço.

Segundo Helene e Terzian (1992), a existência de diversos métodos de dosagem foi oriunda da ausência de um consenso nacional, que levou vários pesquisadores a propor sua própria metodologia. Os autores ainda ressaltam que apesar das diferenças entre os procedimentos propostos, existem atividades comuns como o cálculo da resistência de dosagem, a correlação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento, crescimento da resistência com o tempo, consumo de água, determinados ajustes experimentais e correções em obra.

Neville (2016) representou os fatores básicos e a sequência de decisões para o

processo de dosagem na Figura 20.

Figura 20 - Fatores básicos do processo de dosagem



Fonte: Neville (2016)

Dentre os fatores presentes na figura acima, podemos citar o espaçamento e cobertura da armadura, condicionantes para a determinação da dimensão máxima característica do agregado, conforme mencionado no item 3.2.2.

A norma brasileira NBR 12.655 (ABNT, 2015b) estabelece os requisitos para as propriedades do concreto fresco, da sua composição, preparo e controle, bem como da sua aceitação e recebimento. Mediante a classe de agressividade ambiental, a referida norma estabeleceu alguns critérios de qualidade, indicados na Tabela 18, onde CA representa o concreto armado e CP indica o concreto protendido. Acrescenta-se que a “Classe de concreto”, indicada na referida tabela, refere-se a sua classe de resistência, definida pela NBR 8953 (ABNT, 2015a), que corresponde à resistência característica à compressão, em megapascals (MPa). Desse modo, as classes C20, C25, C30, C35 e C40 representam as resistências à compressão de 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, respectivamente.

Tabela 18 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

| Concreto | Tipo | Classe de agressividade | | | |
|--|------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | I | II | III | IV |
| Relação água/cimento em massa | CA | $\leq 0,65$ | $\leq 0,60$ | $\leq 0,55$ | $\leq 0,45$ |
| | CP | $\leq 0,60$ | $\leq 0,55$ | $\leq 0,50$ | $\leq 0,45$ |
| Classe de concreto (ABNT NBR 8953) | CA | $\geq C20$ | $\geq C25$ | $\geq C30$ | $\geq C40$ |
| | CP | $\geq C25$ | $\geq C30$ | $\geq C35$ | $\geq C40$ |
| Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m^3 | CA e | ≥ 260 | ≥ 280 | ≥ 320 | ≥ 360 |
| | CP | ≥ 260 | ≥ 280 | ≥ 320 | ≥ 360 |

Fonte: ABNT (2015b)

A norma supramencionada estabelece que a composição de concretos a partir da classe C20 deve ser definida por meio de dosagem racional e experimental, com os mesmos materiais e condições semelhantes às encontradas na obra, mediante parâmetros de projeto e condições de execução. De acordo com a mesma, a resistência de dosagem deve ser determinada considerando-se as condições de variação existentes durante a execução da obra. Essa variabilidade é representada pelo desvio padrão (S_d), sendo inclusa no cálculo da resistência de dosagem, de acordo com a Equação (1).

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \times S_d \quad (1)$$

Onde

f_{cmj} : resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias (MPa);

f_{ckj} : resistência característica do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias (MPa);

S_d : desvio padrão da dosagem (MPa).

Para concretos com o desvio padrão desconhecido, o S_d é determinado de acordo com as condições de preparo do mesmo (ABNT, 2015b). Os valores a serem adotados se encontram na Tabela 19.

Tabela 19 - Desvio padrão do concreto em função da condição de preparo

| Condição de preparo do concreto | Desvio-padrão (MPa) |
|---------------------------------|---------------------|
| A | 4,0 |
| B | 5,5 |
| C | 7,0 |

Fonte: ABNT (2015b)

As condições de preparo do concreto e suas aplicações, de acordo com a NBR 12.655 (ABNT, 2015b), estão descritas na Tabela 20.

Tabela 20 - Condições de preparo do concreto

| Condição de preparo do concreto | Aplicabilidade | Formas de aferição dos componentes | | |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|---|
| | | Cimento | Água de amassamento | Agregados |
| A | Todas as classes de concreto | Massa | Massa ou volume por dispositivo dosador ^a | Massa |
| B | Classes C10 a C20 | Massa | Volume por dispositivo dosador | Massa combinada com volume ^b |
| C | Classes C10 e C15 | Massa | Volume ^c | Volume |

^a Quantidade corrigida em função da umidade dos agregados.
^b Realizada através da conversão de massa em volume de agregados, considerando a umidade da areia, devendo o canteiro dispor de meios confiáveis para tal prática.
^c Quantidade corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto.

Fonte: adaptado de ABNT (2015b)

Segundo Boggio (2000), os métodos de dosagem da ABCP/ACI e do IPT/EPUSP apresentaram grande difusão quanto ao seu conhecimento e uso no Brasil, devido ao peso das instituições que os elaboraram e divulgaram. O autor complementou que a aplicação dos métodos em locais com bom desenvolvimento tecnológico colaborou para sua utilização generalizada e que tais tecnologias tendem a se espalhar para regiões vizinhas.

3.2.3.1. Método da ABCP/ACI

Segundo Boggio (2000), o referido método foi publicado inicialmente em 1984 pela ABCP como um Estudo Técnico (ET) denominado “Parâmetros de Dosagem do Concreto”, elaborado pelo Eng. Públio Penna Firme Rodrigues, tendo sido revisado em 1995. Assunção (2002) cita que se trata do ET-67. Conforme Marmitti *et al.* (2016), o referido método é largamente empregado no Brasil, sendo o mesmo considerado racional, pois considera as propriedades físicas e mecânicas do cimento e agregados. Os autores ainda afirmam que podem ser escolhidas faixas de trabalhabilidade, além do desvio padrão conforme definido pela NBR 12.655, para a determinação da resistência de dosagem (f_{c28}).

Segundo o próprio Rodrigues (1995), a metodologia trata-se de uma adaptação às condições brasileiras do método do American Concrete Institute (ACI), especialmente relacionada aos agregados especificados pela NBR 7211. Boggio (2000) afirma que tal

adequação permite a aplicação de agregados graúdos britados e areia de rio que se enquadram na NBR 7211. O autor cita que o referido método consiste em uma ferramenta de dosagem de concretos convencionais adequada aos materiais mais utilizados em diversas regiões do Brasil, pois as suas tabelas e gráficos foram elaboradas a partir de médias de resultados experimentais.

O método ABCP/ACI é recomendado para a obtenção de concretos com trabalhabilidade adequada à moldagem *in loco*, devendo ter consistência de plástica a fluida, não sendo aplicável a concretos com agregados leves (RODRIGUES, 1995). Segundo Boggio (2000), tal método se preocupa com a trabalhabilidade por meio de fatores relativos aos materiais, condições de execução, adensamento e dimensões das peças. O mesmo complementa que um dos conceitos fundamentais do método é a vinculação de um volume máximo de agregado compactado seco por m³ de concreto, para cada granulometria de areia e dimensão máxima de agregado graúdo.

De acordo com Dafico (1997) os principais requisitos de projeto para o método são: resistência à compressão, relação água/cimento (a/c) máxima em função da agressividade do meio, abatimento e a dimensão máxima característica do agregado. O autor ainda cita como dados necessários: a resistência à compressão e massa específica do cimento, a dimensão máxima característica, massa específica e massa unitária compactada seca do agregado graúdo, além do módulo de finura e massa específica do agregado miúdo.

Segundo Rabelo e Garcia (2013), antes de executar a dosagem por esse método, é necessária a obtenção das características dos materiais a serem utilizados, para depois realizar as etapas seguintes, que consistem na fixação da relação a/c e a obtenção do consumo dos materiais. Os autores supracitados ainda citam que ao conhecer as especificidades dos materiais devem-se definir as características do concreto.

Rodrigues (1995) descreve o método de dosagem em cinco etapas: fixação da relação a/c, determinação do consumo de cimento, água e agregados, além da apresentação do traço. Além disso, o mesmo recomenda a verificação experimental do traço para eventuais correções.

O autor afirma que a fixação da relação a/c, devendo ser realizada mediante critérios de durabilidade e resistência mecânica. Quanto à durabilidade, o referido cita que se podem adotar as recomendações do ACI, dispostas Tabela 21, ou realizar estudos específicos, levando em consideração o grau de exposição e a intensidade dos agentes agressivos ao

concreto. Além disso, deve ser adotada a relação a/c em função da resistência à compressão do cimento e a resistência à compressão do concreto, através do gráfico da Figura 21 (RODRIGUES, 1995).

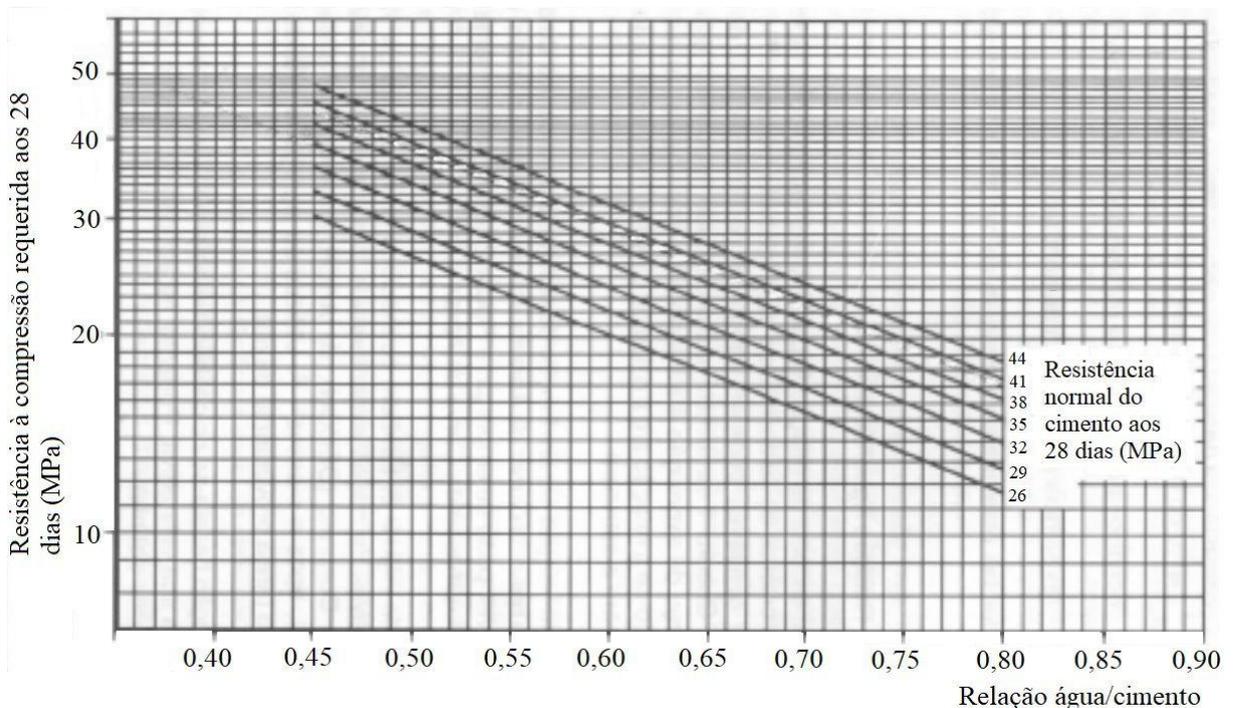
Tabela 21 - Relação a/c em concretos submetidos a situações severas

| Tipo da estrutura | Estrutura exposta à ação da água do mar ou sulfatadas ¹ |
|--|--|
| Peças delgadas e seções com menos de 2,5 cm de cobertura de armadura | 0,40 |
| Outros | 0,45 |

¹ Para cimentos resistentes a sulfatos a relação a/c pode aumentar em 0,05

Fonte: ACI (1982) apud Rodrigues (1995)

Figura 21 - Gráfico para a obtenção da relação a/c em função da resistência à compressão do concreto e cimento aos 28 dias



Fonte: Rodrigues (1995)

Vale salientar que a NBR 12.655 (ABNT, 2015b) estabelece parâmetros de relação a/c em função da classe de agressividade ambiental, conforme Tabela 18, já citada anteriormente.

Em seguida, é determinado o consumo aproximado de água no concreto de modo a se atingir determinada consistência, que está relacionada a propriedades e proporções dos componentes utilizados, com predominância dos agregados, de acordo com Rodrigues (1995). O mesmo complementa que o seu grau de intensidade está associado à distribuição granulométrica, forma e textura das partículas, onde àquelas que possuem formas arredondada

e superficialmente lisas são mais propícias à obtenção de concretos com menor consumo de água. O autor conclui ser quase impossível determinar a quantidade de água associando-a matematicamente a características e quantidade dos demais componentes do concreto, devendo os valores da Tabela 22 serem utilizados apenas como aproximação inicial.

Tabela 22 - Consumo de água aproximado (l/m³)

| Abatimento de tronco de cone (mm) | Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm) | | | | |
|-----------------------------------|--|------|------|------|------|
| | 9,5 | 19,0 | 25,0 | 32,0 | 38,0 |
| 40 a 60 | 220 | 195 | 190 | 185 | 180 |
| 60 a 80 | 225 | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 80 a 100 | 230 | 205 | 200 | 195 | 190 |

Fonte: Rodrigues (1995)

O consumo de água exato pode ser determinado experimentalmente através de 2 ou 3 tentativas, realizando-se o ensaio de abatimento de tronco de cone (RODRIGUES, 1995). Atualmente, o referido ensaio é executado conforme procedimento determinado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Com a Equação (2), proposta por Murdock (1960 apud RODRIGUES, 1995), é possível determinar o consumo de água necessário em função do consumo inicial e dos abatimentos inicial e requerido.

$$C_{ar} = C_{ai} \times \left(\frac{a_r}{a_i} \right)^{0,1} \quad (2)$$

Onde

C_{ar} : consumo de água requerido;

C_{ai} : consumo de água inicial;

a_r : abatimento requerido;

a_i : abatimento inicial.

Boggio (2000) menciona a necessidade de redução da água adicionada proporcionalmente a umidade dos agregados, enquanto deverá ser aumentada em quantidade igual à absorção dos mesmos.

O autor supracitado ressalta que o método da ABCP desconsidera as estimativas realizadas pela ACI referentes à quantidade de ar aprisionado no concreto, prevendo-se uma redução no volume de água ao se introduzir ar intencionalmente. O autor explica que tal ação decorreu devido à incorporação de ar proposital não ser habitual no Brasil, pois não são

frequentes condições climáticas severas devido a baixas temperaturas e congelamento.

Posteriormente, calcula-se o consumo de cimento em função do consumo de água obtido e da relação a/c, de acordo com a Equação (3), conforme descrito por Rodrigues (1995).

$$C = \frac{C_a}{a/c} \quad (3)$$

Onde

C: Consumo de cimento por m³ de concreto;

C_a: Consumo de água por m³ de concreto;

a/c: Relação água cimento.

O autor complementa que o cálculo do consumo de cimento depende da água e seu acerto está vinculado à precisão com que se realizou a estimativa.

Segundo Boggio (2000), devido ao método ABCP ter por objetivo obter o menor volume de vazios possível para determinada trabalhabilidade, distribui-se proporcionalmente agregados miúdos e graúdos de modo a obter-se o máximo volume compactado seco. A distribuição dos agregados é realizada obtendo-se o teor ótimo de agregado graúdo, em função da sua dimensão máxima característica e do módulo de finura da areia (RODRIGUES, 1995). O volume compactado seco de agregado graúdo (V_c) por m³ de concreto pode ser obtido através da Tabela 23, em função da sua dimensão máxima característica (D_{máx}) e do módulo de finura (MF) da areia.

Tabela 23 - Volume compactado seco de agregado graúdo por m³ de concreto

| MF | D _{máx} (mm) | | | | |
|-----|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 9,5 | 19,0 | 25,0 | 32,0 | 38,0 |
| 1,8 | 0,645 | 0,770 | 0,795 | 0,820 | 0,845 |
| 2,0 | 0,625 | 0,750 | 0,775 | 0,800 | 0,825 |
| 2,2 | 0,605 | 0,730 | 0,755 | 0,780 | 0,805 |
| 2,4 | 0,585 | 0,710 | 0,735 | 0,760 | 0,785 |
| 2,6 | 0,565 | 0,690 | 0,715 | 0,740 | 0,765 |
| 2,8 | 0,545 | 0,670 | 0,695 | 0,720 | 0,745 |
| 3,0 | 0,525 | 0,650 | 0,675 | 0,700 | 0,725 |
| 3,2 | 0,505 | 0,630 | 0,655 | 0,680 | 0,705 |
| 3,4 | 0,485 | 0,610 | 0,635 | 0,660 | 0,685 |
| 3,6 | 0,465 | 0,590 | 0,615 | 0,640 | 0,665 |

Fonte: Rodrigues (1995)

O consumo de agregado graúdo é determinado pela Equação (4), proposta por Rodrigues (1995).

$$C_b = V_c \times M_c \quad (4)$$

Onde

C_b : Consumo de agregado graúdo por m^3 de concreto;

V_c : Volume compactado seco de agregado graúdo (m^3);

M_c : Massa unitária compactada do agregado graúdo (kg/m^3).

A próxima etapa do estudo de dosagem consiste na determinação do consumo de agregado miúdo, realizada pelo método volumétrico, considerando que o concreto é composto pela soma dos volumes absolutos do cimento, água, agregados e ar aprisionado, conforme descrito por Boggio (2000). No entanto, Rodrigues (1995) considerou na mistura a soma dos volumes do cimento, agregados e água, onde o volume de agregado miúdo é calculado através da Equação (5).

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad (5)$$

Onde

V_m : Volume de agregado miúdo por m^3 de concreto;

ρ_c : Massa específica do cimento (kg/m^3);

ρ_b : Massa específica do agregado graúdo (kg/m^3);

ρ_a : Massa específica da água ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$);

O consumo de agregado miúdo é obtido multiplicando-se V_m pela massa específica do agregado miúdo, conforme descrito na Equação (6), descrita pelo mesmo autor.

$$C_m = \rho_m \times V_m \quad (6)$$

Onde

C_m : Consumo de agregado miúdo por m^3 de concreto;

V_m : Volume de agregado miúdo por m^3 de concreto;

ρ_m : Massa específica do agregado miúdo (kg/m^3).

Quanto à representação das proporções dos componentes, o mesmo afirma ser comum realizá-la por meio de seu traço, em massa ou volume, em relação a uma unidade de medida do cimento. A representação em massa ocorre conforme descrito na Tabela 24.

Tabela 24 - Apresentação do traço em massa para uma unidade de cimento

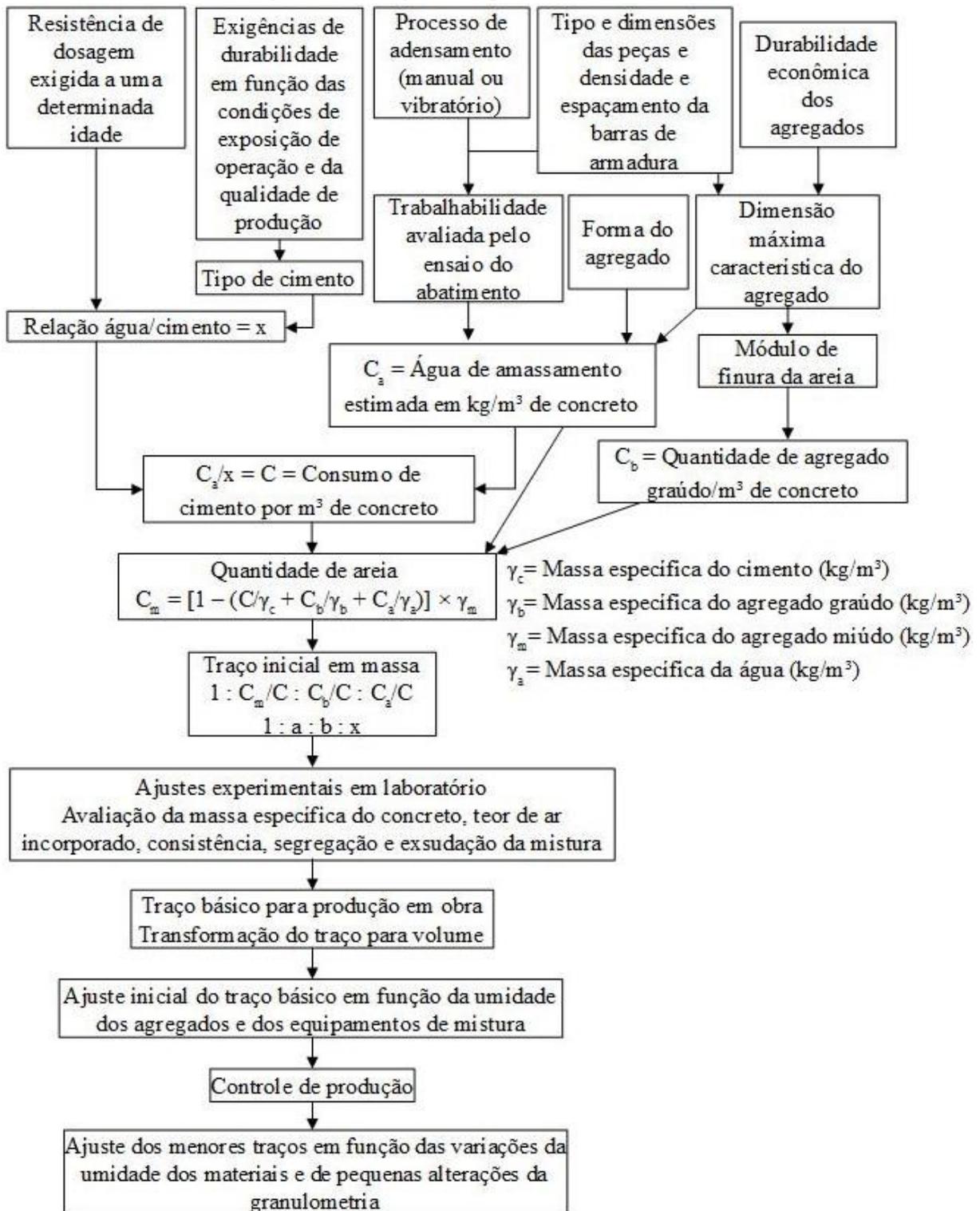
| Cimento | Agregado Miúdo | Agregado Graúdo | Relação a/c |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | $\frac{C_m}{C}$ | $\frac{C_b}{C}$ | $\frac{C_a}{C}$ |

Fonte: Rodrigues (1995)

Rodrigues (1995) ainda destaca a importância da realização experimental da mistura para acerto do traço estimado, recomendando inserir a água de amassamento gradativamente, até obter-se a consistência desejada. Ele ressalta que o método ABCP foi desenvolvido de modo a fornecer o mais baixo teor de areia, proporcionando vantagem econômica e facilidade para identificação de misturas inadequadas. Para sua execução em laboratório, é recomendado utilizar uma betoneira de iguais características àquela que será utilizada na obra, de modo a não haver risco de obtenção de uma mistura inadequada (POWERS, 1968 apud RODRIGUES, 1995; SOBRAL, 1984 apud RODRIGUES, 1995).

Segundo Boggio (2000) o concreto deverá ser avaliado quanto à massa específica e teor de ar, observando a consistência de maneira a não haver segregação, nem exsudação excessiva. Na Figura 22 se encontra um fluxograma para o método de dosagem ABCP, elaborado pelo autor supramencionado, adaptado mediante parâmetros apresentados por Rodrigues (1995).

Figura 22 - Fluxograma simplificado do método ABCP



Fonte: adaptado de Boggio (2000)

3.2.3.2. Método do IPT/EPUSP

Segundo Tutikian e Helene (2011), o referido método foi proposto inicialmente por Ary Frederico Torres (1927), Simão Prizskulnik (1977) e Carlos Tango (1986). Os autores ainda citam a publicação intitulada “Manual de dosagem e controle do concreto” (HELENE; TERZIAN, 1992), afirmando que a mesma reúne resultados de pesquisas realizadas por Helene na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) por vários anos. Boggio (2000) menciona que a referida obra se trata de uma atualização e generalização realizada na EPUSP, a partir de um método concebido primeiramente no IPT. Helene e Terzian (1992) afirmam que o modelo apresentado no manual foi comprovado experimentalmente mediante análise de resultados de ensaios mensais obtidos do arquivo do IPT em um período de 17 anos.

Toralles *et al.* (2018) cita que o método se baseia na obtenção experimental de um teor ideal de argamassa para recobrimento do agregado graúdo. De acordo com os autores o mesmo é dividido em duas etapas: determinação do teor ideal de argamassa e traçado do ábaco de dosagem.

Helene e Terzian (1992) definem inicialmente três conceitos fundamentais. O primeiro consta que a relação a/c é o parâmetro mais importante do concreto estrutural. O segundo afirma que a resistência e durabilidade do concreto torna-se única após a definição da relação a/c e certos materiais. Enquanto o terceiro consiste que quanto maior a dimensão máxima característica do agregado graúdo e menor o abatimento de tronco de cone, mais econômico será o concreto. Os autores ainda citam as “leis de comportamento”, sendo ela a lei de Abrams, lei de Lyse e lei de Molinari, representadas pelas Equações (7), (8) e (9), respectivamente, além do cálculo do teor de argamassa seca, representado pela Equação (10).

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (7)$$

$$m = k_3 + k_4 \times a/c \quad (8)$$

$$C = \frac{(1.000 - ar)}{(k_5 + k_6 \times m)} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad (10)$$

$$m = a + p \quad (11)$$

Onde

f_{cj} : Resistência à compressão axial à idade j (MPa);

a/c : Relação água/cimento em massa (kg/kg);

m : Relação agregados secos/cimento em massa (kg/kg);

C : Consumo de cimento por m^3 de concreto;

α : Teor de argamassa seca, devendo ser constante para determinada situação (kg/kg);

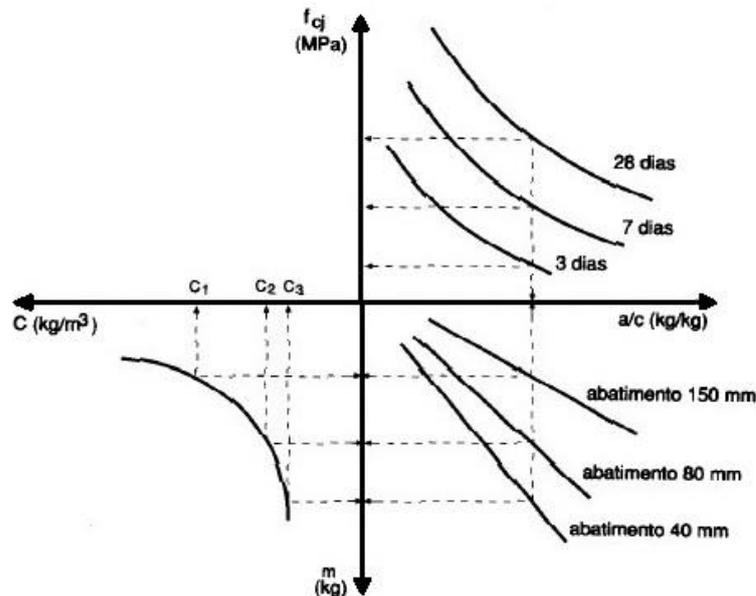
a : Relação agregado miúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

p : Relação agregado graúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$: Constantes que dependem apenas dos materiais (cimento, agregados e aditivos).

As três “leis de comportamento”, supracitadas, resultam em um diagrama de dosagem sobre três quadrantes (BOGGIO, 2000), conforme exemplo da Figura 23.

Figura 23 - Modelo de diagrama de dosagem



Fonte: Helene e Terzian (1992)

Helene e Terzian (1992) ainda apresentaram três “leis complementares”, onde duas destinaram-se para o cálculo do consumo de cimento por metro cúbico de concreto, conforme Equações (12) e (13), e um para a determinação do consumo de água, representado pela Equação (14).

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + a/c} \quad (12)$$

$$C = \frac{(1.000 - ar)}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c} \quad (13)$$

$$Q = C \times a/c \quad (14)$$

Onde

C: Consumo de cimento por m³ de concreto;

Q: Consumo de água por m³ de concreto;

γ : Massa específica do concreto (kg/m³);

γ_c : Massa específica do cimento (kg/m³);

γ_a : Massa específica do agregado miúdo (kg/l);

γ_p : Massa específica do agregado graúdo (kg/l);

ar: Teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico (l/m³).

Segundo Dafico (1997), os principais requisitos necessários à realização da dosagem pelo referido método são a resistência característica à compressão, relação a/c máxima em função da agressividade do meio, abatimento e dimensão máxima característica do agregado. Boggio (2000) cita que a consistência do concreto fresco está relacionada à forma e granulometria do agregado graúdo e consistência da argamassa que, por sua vez, está vinculada à forma e granulometria do agregado miúdo e consistência da pasta, que depende da relação a/c. Helene e Terzian (1992) ainda mencionam o espaçamento entre barras, a definição dos elementos estruturais, o uso de aditivo quando necessário e a estimativa de perda de argamassa durante o transporte como informações básicas para a realização do procedimento de dosagem. Vale salientar que a dimensão máxima do agregado graúdo pode ser determinada mediante requisito estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme citado no item 3.2.2. Além disso, o abatimento pode ser determinado mediante suas aplicações típicas que constam na NBR 8953 (ABNT, 2015a), conforme Tabela 28, constante no item 3.2.4.

Quanto à relação a/c, Helene e Terzian (1992) sugerem a utilização das correlações obtidas por Helene (1987), onde constam na Tabela 25 as mesmas para uma idade de 28 dias. Os dados citados abaixo se referem às constantes k_1 e k_2 da “lei de Abrams”, conforme Equação (7). Acrescenta-se que as siglas CP, AF e POZ correspondem aos cimentos Portland Comum, de alto forno e pozolânico, respectivamente, e a classe indicada ao lado corresponde a sua resistência à compressão aos 28 dias (HELENE, 1987).

O estudo experimental visa à montagem do diagrama de dosagem correlacionando a resistência à compressão, relação água/cimento, teor agregado/cimento e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto (BOGGIO, 2000).

Tabela 25 - Constantes para correlação entre a resistência à compressão do concreto e a relação a/c para cada tipo e classe de cimento

| Tipo e classe do cimento | k_1 | k_2 |
|--------------------------|-------|-------|
| CP 32 | 92,8 | 7,9 |
| AF 32 | 121,2 | 10,2 |
| POZ 32 | 99,7 | 11,4 |

Fonte: Adaptado de Helene (1987)

Segundo Helene e Terzian (1992), o estudo experimental inicia-se com uma análise prévia, com mistura em betoneira no traço 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa). Com os dados obtidos na mistura supracitada, os autores sugerem a confecção de mais duas, com os traços 1:3,5 (rico) e 1:6,5 (pobre). De acordo com os mesmos, o objetivo do estudo é determinar o teor ideal de argamassa da mistura (mínimo possível), determinando-se a proporção adequada por tentativas e observações práticas, para o traço estabelecido de 1:5.

Segundo Boggio (2000), o teor ideal de argamassa consiste na obtenção experimental da quantidade mínima de materiais finos (cimento e agregados miúdos) necessários para o concreto atingir uma trabalhabilidade compatível com os processos de transporte, lançamento e adensamento a serem aplicados. Além disso, o autor complementa que tal parâmetro deverá ser suficiente para alcançar um acabamento superficial adequado às exigências da peça e tipo de estrutura. Santos (2016) menciona que teores baixos de argamassa em uma mistura acarretam maior porosidade ou o aparecimento de falhas durante a concretagem. O mesmo complementa que o seu excesso pode resultar em fissuração térmica motivada pela retração por secagem, devido ao alto consumo de cimento, além elevar o custo final do concreto.

Helene e Terzian (1992) descrevem uma sequência de atividades para o estudo experimental do concreto, sendo elas:

- 1) Imprimir a betoneira com uma porção igual ou superior a 6 kg de concreto no traço 1:2:3 e $a/c = 0,65$, devendo-se deixar o material cair livremente quando a betoneira estiver com a abertura para baixo e em movimento;
- 2) Após a pesagem e lançamento dos primeiros materiais, deve-se misturá-los por 5 minutos, com uma parada intermediária para limpeza das pás da betoneira. Ao final, deverá ser verificada a possibilidade de se realizar o ensaio de abatimento de

tronco de cone, demonstrando se há coesão e plasticidade adequadas;

- 3) A introdução de materiais na betoneira deverá ocorrer na seguinte ordem: água (80%), agregado graúdo (100%), agregado miúdo (100%), cimento (100%), restante da água e aditivo, caso haja;
- 4) Posteriormente, são realizados acréscimos sucessivos de argamassa, lançando-se cimento e areia, mantendo-se inalterada a quantidade de agregado graúdo;
- 5) Determinação do teor ideal de argamassa, através do procedimento a seguir:
 - a) Retirar todo material da superfície interna e das pás da betoneira desligada;
 - b) Utilizando uma colher de pedreiro, deve-se trazer todo o material para a região inferior da cuba da betoneira, inserido os agregados soltos no interior da mistura;
 - c) Deve-se passar a colher de pedreiro sobre a superfície do concreto fresco, inserindo-a na massa e levantando em sentido vertical, de modo a observar a presença de vazios na mesma, indicando falta de argamassa;
 - d) Com a colher de pedreiro, retirar uma parte do concreto levantando-o até a parte superior da cuba da betoneira, observando-se a existência de desprendimento de agregado graúdo, também indicador de falta de argamassa na mistura. Posteriormente, deve-se soltar a porção de concreto sobre a colher, verificando se a mesma cai de modo compacto e homogêneo, indicativo de teor de argamassa adequado;
 - e) As misturas que estiverem adequadas aos itens anteriores, dever ser realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, acrescentando-se água caso não seja atingida a faixa estabelecida;
 - f) Bater suavemente na lateral do concreto ainda em formato de tronco de cone, com a haste de socamento, de modo a verificar sua queda. Caso a mesma ocorra de modo homogêneo, significa um bom teor de argamassa;
 - g) Deverá ser observado se a superfície lateral do concreto não apresenta vazios, também indicando um bom teor de argamassa;
 - h) Também se observa a presença de camada de água na base do tronco de cone de concreto, evidenciando uma tendência à exsudação por falta de finos, podendo ser corrigida com mudança na granulometria da areia ou no teor de argamassa;

- i) Estima-se uma perda entre 2 e 4% da argamassa no processo de transporte e lançamento, a ser considerada na determinação do teor final;
- 6) Posteriormente, deverá ser realizada uma nova mistura no traço 1:5, determinando-se todas as suas características, sendo elas: a relação a/c, o consumo de cimento e água por metro cúbico de concreto, a massa específica e o abatimento de tronco de cone;
- 7) Por último, devem-se moldar sete corpos de prova cilíndricos para ruptura nas idades de: três dias (1 unidade), sete dias (1 unidade), 28 dias (2 unidades), 63 dias (2 unidades) e 91 dias (1 unidade).

Para a obtenção do diagrama de dosagem, os autores recomendam a produção de mais dois traços auxiliares, conforme citado anteriormente, com variação de uma unidade e meia no teor total de agregado, para mais e para menos, devendo-se manter fixos os teores de argamassa e abatimento de tronco de cone, obtidos para o traço 1:5.

Posteriormente, com os dados obtidos de forma experimental, obtêm-se as correlações entre o traço e consumo de cimento, bem como o traço e a relação a/c, onde a construção dessas correlações dá origem ao diagrama de dosagem (HELENE; TERZIAN, 1992), conforme exemplo da Figura 23.

A fase final do estudo, de acordo com os autores, consiste na determinação do traço correspondente às premissas de projeto previamente definidas, havendo uma possível necessidade de correção do mesmo dependendo dos valores obtidos de resistência à compressão e do sistema de produção do concreto.

3.2.3.3. Estudos comparativos entre os métodos de dosagem

Boggio (2000) realizou um estudo comparativo de cinco métodos de dosagem, sendo eles: ABCP/ACI, IPT/EPUSP, INT, ITERS e SCNF. Foram utilizadas as relações a/c de 0,45; 0,55; 0,65 e 0,75. Além disso, foi fixado o abatimento em 70 ± 10 mm. Observa-se que o foram encontrados distintos abatimentos para diferentes relações a/c em cada método, ressaltando que o da ABCP/ACI apresentou os maiores valores, conforme indicado na Tabela 26. Vale ressaltar, que o autor considerou como similares os resultados obtidos para a trabalhabilidade para os cinco métodos estudados.

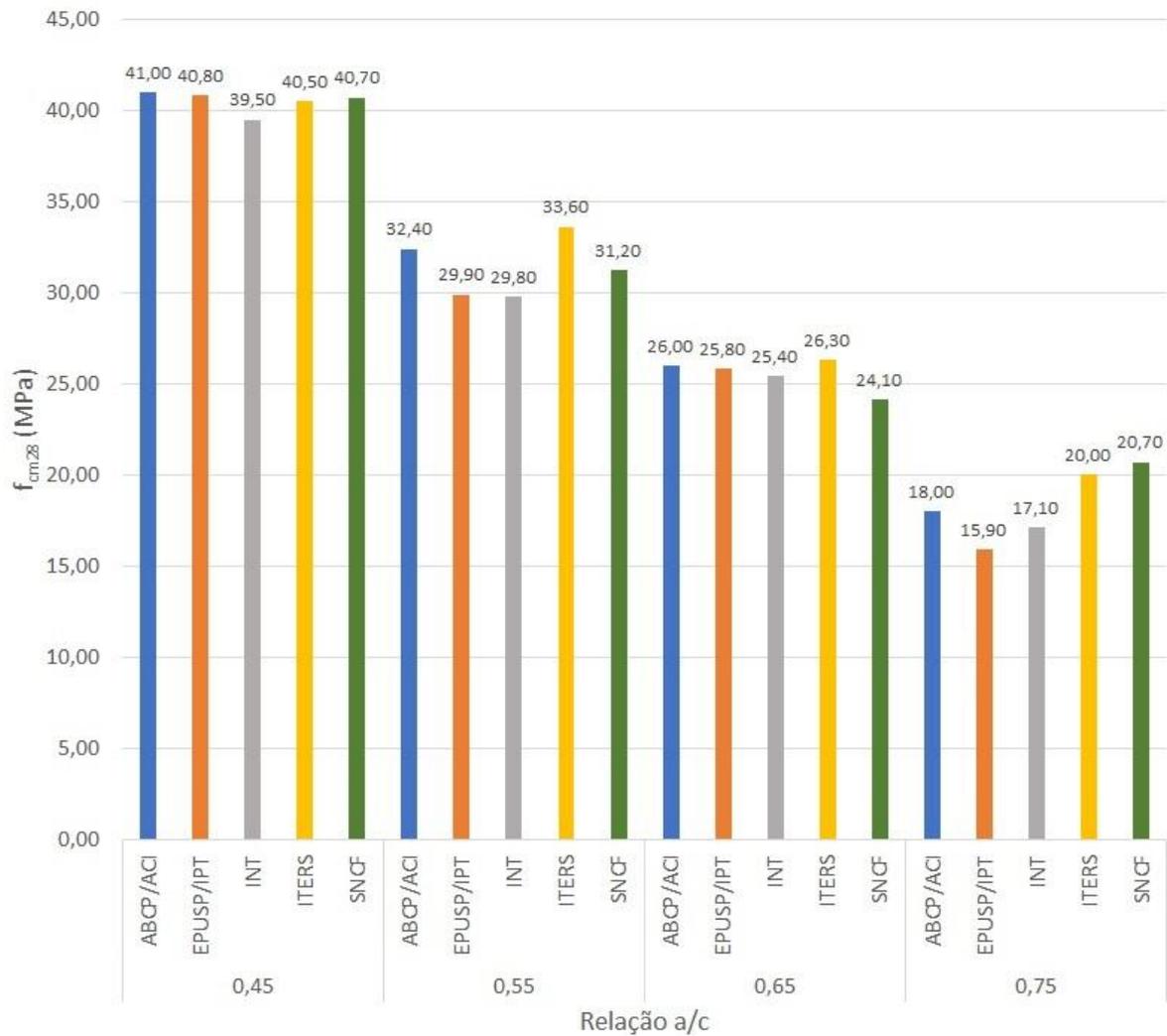
Tabela 26 - Quantidade de água e abatimento no traço para cada relação a/c em cada método

| Parâmetro | Relação a/c | Água total (kg/m ³) | Abatimento (mm) |
|-----------|-------------|---------------------------------|-----------------|
| ABCP/ACI | 0,45 | 183 | 75 |
| | 0,55 | 181 | 75 |
| | 0,65 | 180 | 80 |
| | 0,75 | 175 | 75 |
| EPUSP/IPT | 0,45 | 183 | 70 |
| | 0,55 | 178 | 70 |
| | 0,65 | 175 | 65 |
| | 0,75 | 173 | 65 |
| INT | 0,45 | 179 | 65 |
| | 0,55 | 177 | 65 |
| | 0,65 | 174 | 65 |
| | 0,75 | 172 | 70 |
| ITERS | 0,45 | 182 | 70 |
| | 0,55 | 180 | 70 |
| | 0,65 | 174 | 65 |
| | 0,75 | 173 | 70 |
| SNCF | 0,45 | 180 | 70 |
| | 0,55 | 179 | 75 |
| | 0,65 | 172 | 70 |
| | 0,75 | 172 | 70 |

Fonte: Adaptado de Boggio (2000)

Quanto à resistência à compressão, a pesquisa supramencionada obteve seus valores médios para os concretos dosados por cada método, aos 28 dias de moldagem dos corpos de prova, que constam na Figura 24. O autor afirma não haver diferenças significativas estatisticamente entre as resistências encontradas para as mesmas relações a/c de cada método.

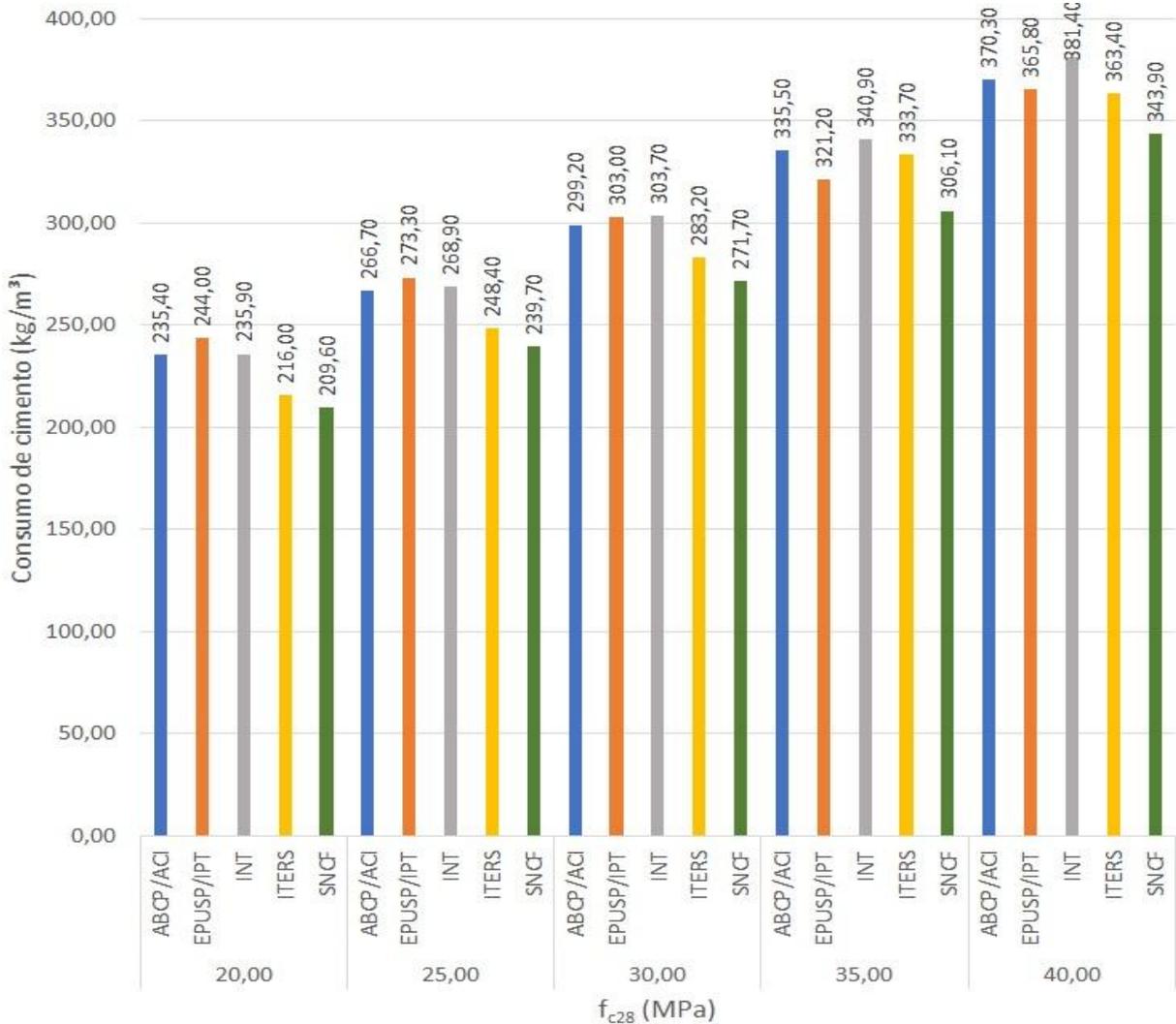
Figura 24 - Comparativo entre a resistência média obtida aos 28 dias (f_{cm28}) e a relação água/cimento (a/c) para cada método de dosagem



Fonte: Adaptado de Boggio (2000)

Referente ao consumo de cimento, a pesquisa constatou existência de diferenças relevantes entre os métodos estudados, a partir de resistências prefixadas. Os dados obtidos no estudo se encontram na Figura 25. O autor classificou os métodos SCNF e ITERS como os de maior eficiência quanto ao consumo de cimento, com os demais apresentando rendimentos similares.

Figura 25 - Comparativo entre o consumo de cimento e resistências à compressão aos 28 dias (f_{c28}) prefixadas, para cada método

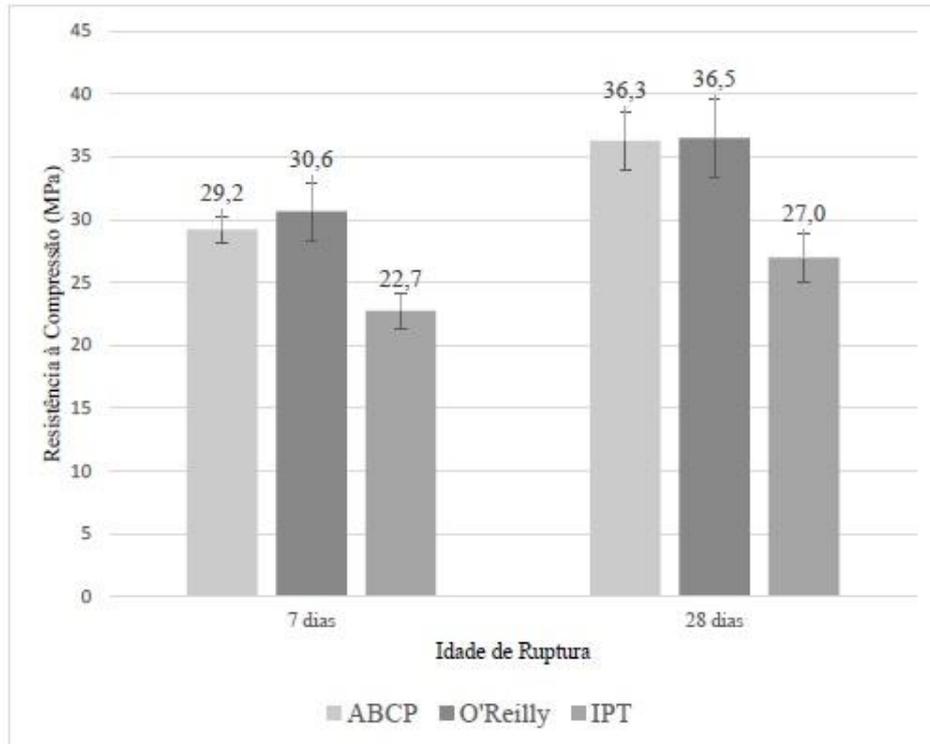


Fonte: Adaptado de Boggio (2000)

Toralles *et al.* (2018) comparou os métodos da ABCP, IPT e O'Reily. Este último, segundo os autores, foi proposto para concretos que buscam maior compacidade na mistura, sendo o mesmo apoiado pelo ACI para a definição de fatores como o consumo de água, resistência à compressão e relação a/c.

Quanto à resistência à compressão, os métodos ABCP e O'Reily apresentaram valores próximos, onde os autores destacam a similaridade dos traços. O resultado obtido pelo método do IPT foi inferior aos anteriores. Os valores encontrados para a resistência à compressão se encontram na Figura 26. Acrescenta-se que foi fixada uma resistência à compressão de 25 MPa.

Figura 26 - Resistência dos concretos aos 7 e 28 dias de idade



Fonte: Toralles et al. (2018)

A similaridade nos traços obtidos pelos métodos ABCP e O'Reilly mencionada pelos mesmos acarretou em consumos de cimento semelhantes, onde o mesmo também citou que este último apresentou uma redução de apenas 1,4%.

Quanto à trabalhabilidade, a referida pesquisa observou que o único método a atingir o abatimento-alvo (8 ± 1 cm) foi o da ABCP, tendo o método O'Reilly apresentado valor acima do limite citado anteriormente, e o IPT abaixo do mesmo.

Os dados obtidos para os traços determinados em cada método de dosagem se encontram na Tabela 27.

Tabela 27 - Características obtidas para cada método de dosagem

| Método | Relação a/c | Consumo de cimento (kg/m ³) | Abatimento (cm) |
|----------|-------------|---|-----------------|
| ABCP/ACI | 0,49 | 418 | 9 |
| O'Reilly | 0,50 | 412 | 14 |
| IPT | 0,59 | 314 | 5,5 |

Fonte: Adaptado de Toralles et al. (2018)

Vale salientar que, de acordo com Toralles *et al.* (2018), o método IPT, apesar de possuir menor consumo de cimento, possivelmente apresentará menor desempenho quanto à durabilidade do concreto, devido a sua maior relação água/cimento, que tende a apresentar

maior quantidade de poros capilares permeáveis. Os mesmos ainda complementaram que para os métodos ABCP e O'Reily, o valor limite para verificação de fluidez sem prejudicar significativamente a durabilidade seria para uma relação a/c de 0,50.

Os estudos citados neste item mostram que o método da ABCP/ACI apresenta desempenho satisfatório na obtenção de concretos de mais trabalháveis com menor adição de água em relação aos demais métodos, sem perdas relevantes na sua resistência.

3.2.4. Trabalhabilidade

Neville (2016) classifica como trabalhável aquele concreto que pode ser facilmente adensado. No entanto, o mesmo ressalta que o significado de trabalhabilidade vai além da facilidade de lançamento e resistência à segregação, e que tal propriedade varia de acordo com cada aplicação específica do concreto e com os meios de adensamento disponíveis. Segundo Sobral (2008), um concreto é considerado trabalhável quando suas propriedades atendem ao tipo de obra destinado (dimensões das peças, afastamento e distribuição das armaduras) e aos modos de lançamento, adensamento e acabamento, sem apresentar segregação ou exsudação. O autor complementa que o concreto trabalhável pode ser adequadamente compactado e envolver completamente as armaduras.

De acordo com Neville (2016), a trabalhabilidade também é uma propriedade fundamental para o concreto endurecido, pois tal propriedade deve proporcionar o máximo adensamento possível. O próprio cita que essa necessidade torna-se aparente a partir da análise da relação entre o grau de adensamento e a resistência resultante, onde a presença de vazios causa uma grande redução em sua resistência.

Kosmatka e Wilson (2011) afirmam que a consistência (fluidez) e a estabilidade (resistência à segregação) estão entre as propriedades do concreto relacionadas à trabalhabilidade. Os mesmos complementam que o grau de trabalhabilidade adequado depende do seu método de lançamento e adensamento, além do tipo do concreto. Além disso, os autores citam características que interferem na trabalhabilidade, sendo elas: o método de transporte e sua duração, quantidade e características dos materiais cimentícios, consistência, propriedades dos agregados, ar incorporado, teor de água, temperaturas do ambiente e do concreto, e aditivos.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que não há um método único para a medição da trabalhabilidade devido à natureza complexa dessa propriedade, além de sua dependência do

tipo de construção e dos métodos de lançamento, adensamento e acabamento. No entanto, os mesmos citam o ensaio de abatimento de tronco de cone como o mais importante para aferição da trabalhabilidade, devido a este ser universalmente utilizado. Conforme Neville (2016), o ensaio supracitado é bastante empregado em canteiros de obra em todo o mundo. Gambhir (2013) menciona que a sua ampla utilização se deve principalmente a simplicidade do equipamento necessário e do procedimento de ensaio. No entanto, o próprio afirma que tal teste é aplicável apenas em concretos de trabalhabilidade média a alta, com abatimentos entre 25 e 125 mm, não indicando qualquer diferença em misturas muito rígidas. Apesar disso, o ensaio de abatimento de tronco de cone tem sido útil na garantia da uniformidade em diferentes lotes, em campo, sendo este limitado para concretos com agregados de dimensão máxima 38 mm (GAMBHIR, 2013).

A realização do referido ensaio é especificada pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), que recomenda a sua utilização em concretos plásticos e coesivos com assentamento a partir de 10 mm, e agregado graúdo de dimensão máxima de 37,5 mm. A norma supracitada ainda orienta que, para agregados com dimensão superior à citada, o ensaio de abatimento seja realizado apenas com o concreto que passa pela peneira de 37,5mm.

A aferição do abatimento é realizada pela diferença entre a altura do molde e o eixo do corpo de prova de concreto, conforme estabelecido pela referida norma. Um exemplo prático da medição realizada no ensaio se encontra na Figura 27.

Figura 27 - Exemplo real de medição do abatimento



Fonte: Araújo *et al.* (2019)

Os concretos são classificados pela sua consistência, determinada pelo ensaio de abatimento conforme norma supracitada, pela NBR 8953 (ABNT, 2015a), conforme Tabela 28.

Tabela 28 - Classes de consistência do concreto

| Classe | Abatimento (mm) | Aplicações típicas |
|--------|--------------------|--|
| S10 | $10 \leq A < 50$ | Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado |
| S50 | $50 \leq A < 100$ | Alguns tipos de pavimentos e elementos de fundações |
| S100 | $100 \leq A < 160$ | Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto |
| S160 | $160 \leq A < 220$ | Elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto |
| S220 | ≥ 220 | Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armadura |

Fonte: ABNT (2015a)

De acordo com Neville (2016), o teor de água na mistura é o principal fator que influi na trabalhabilidade do concreto. O autor afirma que o teor de água independe da relação agregado/cimento ou do teor de cimento da mistura, possibilitando a estimativa das proporções de concreto com diferentes consumos de cimento. Gambhir (2013) cita que a mudança na trabalhabilidade referente à variação no teor de água independe da composição do concreto em amplos limites. O mesmo complementa que o aumento da trabalhabilidade relativo à quantidade de água leva a um estado no qual ocorre segregação e exsudação da mistura, resultando em problemas mais sérios de retração e fluência no concreto endurecido caso eleve-se seu teor.

A relação água/cimento é limitada a um valor máximo relacionado à resistência de projeto do concreto endurecido, e a mesma determina por si só as propriedades intrínsecas da pasta de cimento (GAMBHIR, 2013). Vale salientar a citação do referido autor que diz: “Os requisitos de trabalhabilidade indicam que existe pasta de cimento suficiente para envolver ou lubrificar as partículas do agregado, bem como preencher os vazios no agregado.” (GAMBHIR, 2013, p. 193, tradução nossa).

Quanto ao consumo de cimento, Mehta e Monteiro (1994) mencionam que uma redução considerável na sua quantidade tende a produzir misturas ásperas, com acabamento precário, em concretos convencionais. Entretanto, para concretos com altos teores de cimento ou com material de elevada finura, os autores supracitados afirmam que estes possuem excelente coesão, porém tendem a ser viscosos.

Para teor de água e demais proporções da mistura constantes, a dimensão máxima do agregado, sua granulometria, forma e textura irão determinar a trabalhabilidade (NEVILLE, 2016). Mehta e Monteiro (1994) mencionam que areias muito finas ou angulosas precisarão de mais água para determinada consistência, produzindo misturas mais ásperas e pouco trabalháveis com um teor de água que seria adequado a grãos de maior diâmetro ou bem arredondados. Segundo Gambhir (2013), o uso de areia mais fina resulta em uma área de superfície específica maior, sendo necessária maior quantidade de água determinada trabalhabilidade. Referente à textura da superfície, vale salientar que um agregado de superfície rugosa possui área de superfície superior a de um grão arredondado liso de mesmo volume (GAMBHIR, 2013). O autor ainda cita que agregados angulares, alongados, ou em flocos proporcionam baixa trabalhabilidade devido ao crescimento de volume de vazios e interferência entre as partículas.

Mehta e Monteiro (1994) ainda citam a incorporação de ar como mecanismo de melhoria de consistência, sendo este mais perceptível em misturas ásperas e pouco trabalháveis, além da substituição de parte do agregado miúdo por cinza volante, que reduz o abatimento para determinada quantidade de água.

3.2.5. Resistência à compressão

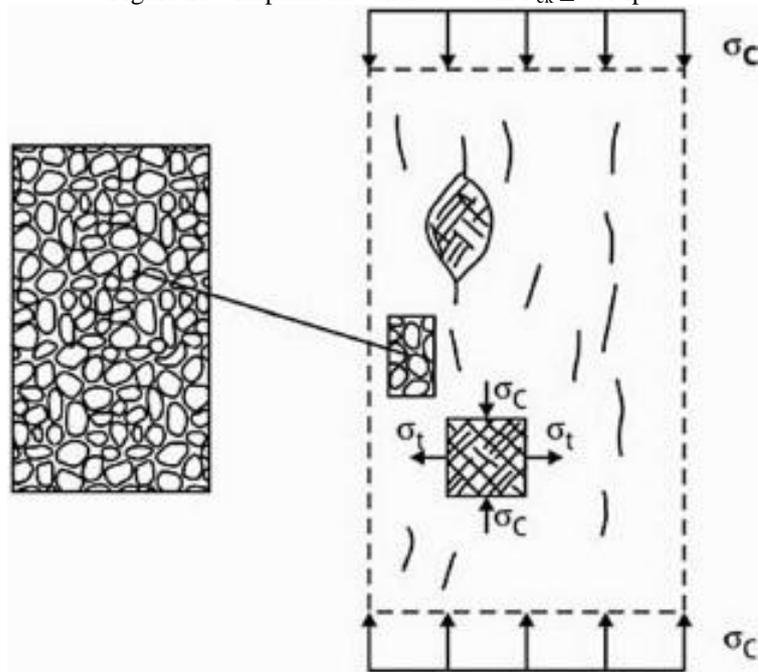
A resistência é definida como a capacidade de resistir à tensão sem ruptura, sendo esta identificada, algumas vezes, pelo aparecimento de fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A resistência à compressão é o parâmetro mais importante para projetos de estruturas em concreto armado (GANGARAO; TALY; VIJAY, 2007). A atenção dada à propriedade mencionada decorre de que o concreto é projetado para suportar, principalmente, tensões de compressão (GAMBHIR, 2013). De acordo com Helene e Terzian (1992), sendo considerados aspectos de trabalhabilidade e durabilidade na sua dosagem, a resistência à compressão é o parâmetro que melhor qualifica o concreto.

Diversos fatores influenciam na resistência à compressão do concreto, como: proporção dos componentes, tamanho da amostra, relação água/cimento, tipos de vibração e cura, taxa de carregamento e relação idade/resistência (GANGARAO; TALY; VIJAY, 2007). Os autores ressaltam a possibilidade da variação de propriedades em dois lotes produzidos nas mesmas condições e que o crescimento da resistência à compressão ocorre significativamente até certa idade, com o início da cura. Os mesmos ainda citam a influência expressiva da

umidade no aumento da resistência com a idade, e mencionam que, em 180 dias, um concreto curado continuamente úmido é cerca de três vezes mais resistente que àquele curado apenas ao ar.

Segundo Fusco (2008) o concreto é constituído de grãos de agregado graúdo imersos em uma matriz rígida de argamassa. Para concretos com resistência até 40 MPa, ele afirma que a ruptura por compressão longitudinal ocorre mediante ruptura de tração transversal na microestrutura, conforme Figura 28. O autor ainda cita que as fissurações generalizadas, ocorridas para o limite de resistência supracitado se devem às tensões transversais de tração, que surgem devido à maior rigidez do agregado graúdo em relação à matriz de argamassa.

Figura 28 - Ruptura de concretos com $F_{ck} \leq 40\text{Mpa}$



Fonte: Fusco (2008)

Quando a argamassa vai se tornando mais resistente, especialmente para valores superiores a 50 MPa, há uma mudança na forma de ruptura por compressão, não havendo mais microfissuração progressiva quando a resistência da argamassa superar a do agregado graúdo (FUSCO, 2008). O próprio afirma que a ruptura acontece de modo explosivo, com o fraturamento do agregado graúdo por tração transversal na microestrutura.

A NBR 8953 (ABNT, 2015a) classifica os concretos em dois grupos distintos, conforme classe de resistência, de acordo com a Tabela 29.

Tabela 29 - Classes de resistência de concretos estruturais

| Classe de resistência Grupo I | Resistência característica à compressão MPa | Classe de resistência Grupo II | Resistência característica à compressão MPa |
|--------------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| C20 | 20 | C55 | 55 |
| C25 | 25 | C60 | 60 |
| C30 | 30 | C70 | 70 |
| C35 | 35 | C80 | 80 |
| C40 | 40 | C90 | 90 |
| C45 | 45 | C100 | 100 |
| C50 | 50 | - | - |

Fonte: ABNT (2015a)

A padronização dos corpos de prova é normatizada pela NBR 5738 (ABNT, 2016), onde são especificados moldes com diâmetros 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm ou 45 cm; sendo sua altura o dobro o valor do diâmetro. De acordo com a referida norma, os métodos de adensamento deverão ser escolhidos de acordo com a Tabela 30, conforme o abatimento de tronco de cone, realizado de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). A mesma ainda especifica número de camadas e golpes (adensamento manual) durante a moldagem.

Tabela 30 - Métodos de adensamento em função das classes de consistência

| Classe | Abatimento (mm) | Método de adensamento |
|---------------|------------------------|------------------------------|
| S10 | $10 \leq A < 50$ | Mecânico |
| S50 | $50 \leq A < 100$ | Mecânico ou Manual |
| S100 | $100 \leq A < 160$ | |
| S160 | $160 \leq A < 220$ | Manual |
| S220 | ≥ 220 | |

Fonte: ABNT (2016)

O ensaio de rompimento dos corpos de provas é especificado pela NBR 5739 (ABNT, 2018a). Essa norma determina que devam ser aferidos o diâmetro e a altura dos mesmos antes de sua colocação na máquina de ensaios, considerando-se, inclusive, o capeamento, caso este tenha sido empregado como método de sua base. A mesma explicita a Equação (15) para o cálculo da resistência característica à compressão de cada amostra ensaiada.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (15)$$

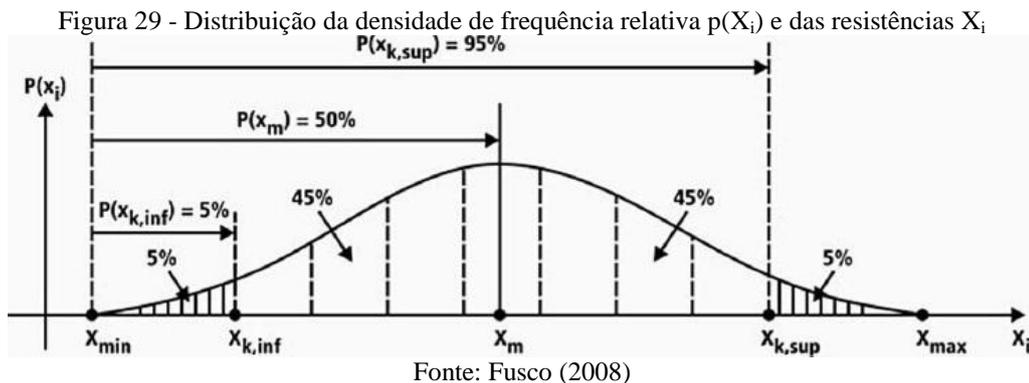
Onde

f_c : Resistência à compressão (MPa);

F : Força máxima alcançada (N);

D : Diâmetro do corpo de prova (mm).

De acordo com Fusco (2008), a resistência do concreto é uma grandeza aleatória, com variabilidade espacial, pois a mesma pode variar em cada lote fabricado ou em cada ponto lançado. Ele ainda afirma que se todo o concreto produzido para determinada estrutura fosse transformado em N corpos de prova, os resultados X_i dos ensaios ocorreriam a uma probabilidade referente à sua distribuição de frequências relativas, podendo inicialmente ser associado à distribuição teórica normal. A mesma se encontra na Figura 29. Segundo Cerqueira (2000), a referida distribuição pode ser representada por dois parâmetros: a média e o desvio padrão.



Vale salientar que os desvios padrão da população e da amostra são calculados conforme Equações (16) e (17), respectivamente, conforme indicado por Fusco (2008).

$$\sigma_c, \text{ população} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\mu_c - X_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$S_c, \text{ amostra} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_i - X_m)^2}{n-1}} \quad (17)$$

Onde

μ_c : Resistência média à compressão da população;

X_m : Resistência média à compressão da amostra;

X_i : Valores obtidos de cada corpo de prova ensaiado;

n : Quantidade valores correspondentes à população e/ou à amostra.

De acordo com Santiago e Beck (2017), a resistência característica do concreto (f_{ck}) deve ser alcançada por, no mínimo, 95% dos corpos de prova testados. Os mesmos complementam que os resultados dos ensaios indicam uma resistência potencial da população com base em uma amostragem e que o concreto é considerado conforme quando até 5% das amostras apresentam resistência à compressão inferior à prevista. A Figura 30 indica o valor do f_{ck} e da resistência média (f_{cm}) em uma distribuição normal, conforme representado por Cerqueira (2000). O autor ainda afirma que a diferença entre uma tensão qualquer (f_c) e a média (f_m) é igual ao produto do desvio padrão (s) pelo coeficiente “ t ”, dependente da probabilidade $P\%$, conforme representado na Figura 31. Os valores de “ t ” se encontram na Tabela 31.

Figura 30 - Distribuição de Gauss com indicação do f_{ck}

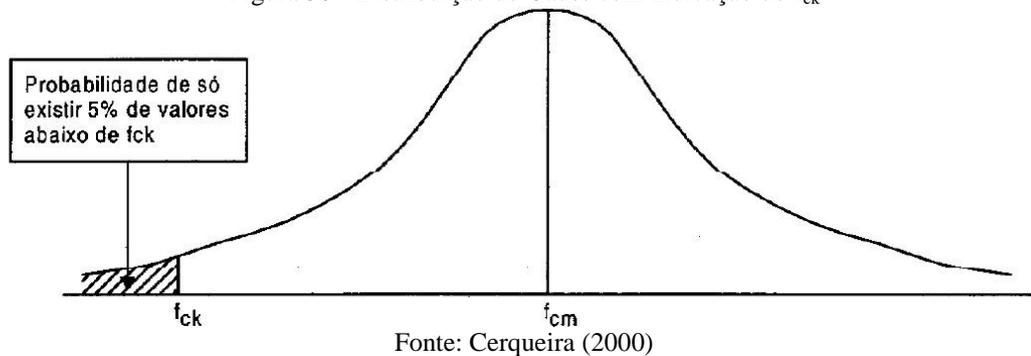


Figura 31 - Representação da diferença entre a média e uma tensão qualquer

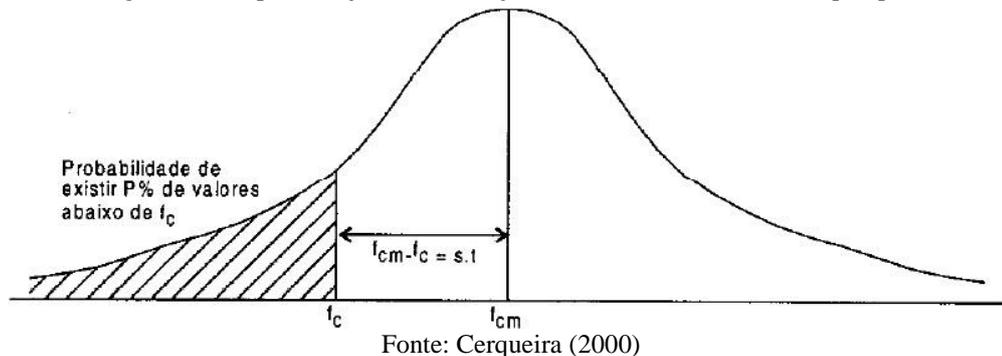
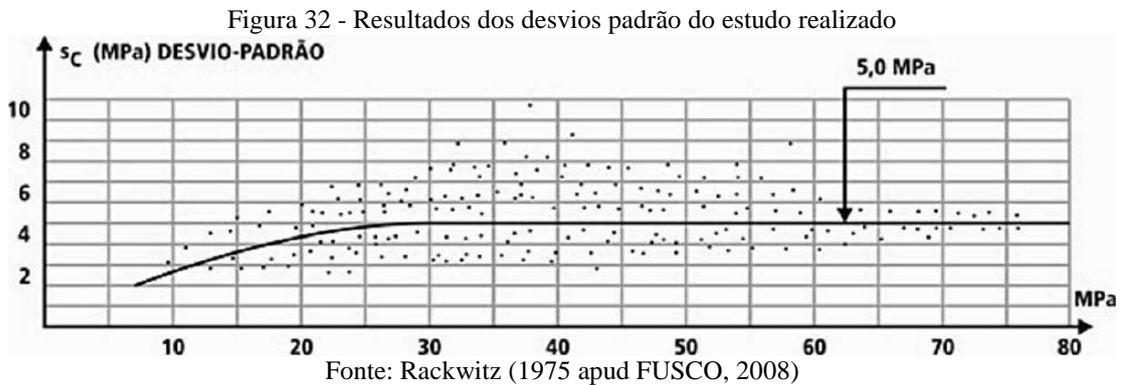


Tabela 31 - Valores de "t" em função da probabilidade P%

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| P% | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 1 | 0,1 |
| t | 0,674 | 0,842 | 1,036 | 1,282 | 1,645 | 1,236 | 3,1 |

Fonte: Cerqueira (2000)

Um estudo internacional realizado por Rackwitz (1975 apud FUSCO, 2008) em mais de 800 obras com amostras de 20 a 100 exemplares encontrou desvio padrão médio da ordem de 5 MPa, variando entre 1 e 10 MPa. Tais resultados se encontram na Figura 32.



O estudo realizado por Santiago e Beck (2017) nas cinco regiões do Brasil, com 27.805 corpos de prova moldados entre 2011 e 2016, observou que as resistências característica (f_{ckest}) para as classes de concreto analisadas apresentaram-se inferiores à resistência especificada (f_{ck}). Entretanto, as resistências médias (f_{cm}) encontradas foram superiores ao f_{ck} , e a quantidade de amostras não conformes variou entre 4,5 a 8,3%, tendendo-se a ser superior aos 5% convencional, segundo os autores. Na Tabela 32 também são apresentados o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (Cve) dos valores obtidos.

Tabela 32 - Resultados dos concretos produzidos no Brasil

| Classe | f_{ckest} (MPa) | f_{cm} (MPa) | σ (MPa) | Cve | % amostras não conformes |
|--------|-------------------|----------------|----------------|-------|--------------------------|
| C20 | 19,2 | 26,2 | 4,3 | 0,164 | 8,3 |
| C30 | 29,2 | 37,3 | 4,9 | 0,131 | 5,7 |
| C40 | 38,5 | 44,7 | 3,8 | 0,084 | 6,9 |
| C50 | 48,0 | 56,1 | 4,9 | 0,088 | 4,5 |

Fonte: Santiago e Beck (2017)

A NBR 12.655 (ABNT, 2015b) especifica dois tipos de controle estatístico do concreto: por amostragem total e parcial. O primeiro consiste na amostragem de todas as

betonadas, representadas por um exemplar¹ cada uma, onde sua resistência ($f_{c,betonada}$) representa a resistência característica à compressão do concreto ($f_{ck,est}$). No segundo, obtêm-se exemplares de betonadas distintas, sendo a resistência característica determinadas de duas maneiras:

a) Para lotes com número de exemplares $6 \leq n < 20$ o valor do $f_{ck,est}$ é representado pela Equação (18):

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m - 1} \right] - f_m \quad (18)$$

Onde

n: número de exemplares da amostra;

m: $\frac{n}{2}$, desprezando-se o valor mais alto, caso n seja ímpar;

f_1, f_2, \dots, f_m : valores individuais de resistência à compressão dos corpos de prova, ordenados de forma crescente.

Acrescenta-se que o valor de $f_{ck,est}$ não pode ser inferior a $\Psi_6 \times f_1$, onde Ψ_6 é obtido através da Tabela 33.

Tabela 33 - Valores de Ψ_6

| Condição de preparo | Número de exemplares (n) | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | ≥ 16 |
| A | 0,82 | 0,86 | 0,89 | 0,91 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 0,97 | 0,99 | 1,00 | 1,02 |
| B ou C | 0,75 | 0,80 | 0,84 | 0,87 | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,96 | 0,98 | 1,00 | 1,02 |

NOTA Os valores de n entre 2 e 5 são empregados para os casos excepcionais

Fonte: ABNT (2015)

b) Para lotes a partir de 20 exemplares, conforme Equações (19) e (20):

$$f_{ck,est} = f_{cm} - 1,65 \times S_d \quad (19)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cm})^2} \quad (20)$$

¹ Um exemplar é constituído por dois corpos de prova da mesma amassada para cada idade de rompimento, moldados no mesmo ato, e sua resistência é o maior dos dois valores obtidos (ABNT, 2015b).

Onde

f_{cm} : Resistência média dos exemplares (MPa);

S_d : desvio padrão da amostra (MPa).

3.2.6. Resistência à tração na flexão

O conhecimento da resistência à tração é necessário para a obtenção da carga em que se inicia a fissuração da estrutura, que é fundamental para sua durabilidade e prevenção de corrosão nas armaduras (NEVILLE, 2016). O próprio ainda cita que tal parâmetro é de interesse em estruturas de concreto simples, como barragens em condições de terremoto. Entretanto, o ensaio de tração axial é de difícil execução (FUSCO, 2008; GAMBHIR, 2013; NEVILLE, 2016). Segundo Fusco (2008), foram propostas várias alternativas, sendo admitidos os ensaios de ruptura à flexão e ruptura indireta por compressão diametral. Gambhir (2013) afirma que a resistência à tração é calculada pelos valores obtidos no ensaio de flexão.

A determinação da resistência à tração na flexão é essencial para estimar a carga com a qual os elementos estruturais devem se romper (GAMBHIR, 2013). O autor complementa que seu conhecimento é empregado em projetos de lajes de pavimentação e pistas de aeródromo, onde as tensões de tração na flexão são críticas. Kosmatka e Wilson (2011) mencionam que a tração na flexão é utilizada em projetos de pavimentos e outras lajes no solo. Os mesmos acrescentam que a resistência à flexão do concreto pode variar de 0,7 a 0,8 vezes a raiz quadrada da sua resistência à compressão, em MPa.

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), o valor da resistência à tração direta pode ser considerado igual a 90% da tração indireta e 70% da tração na flexão. A mesma norma estima a resistência média à tração ($f_{ct,m}$) em função da Equação (21) para concretos de classe até C50 e Equação (22) para classes entre C55 e C90.

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (21)$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11 f_{ck}) \quad (22)$$

Onde

$f_{ct,m}$: Resistência média à tração (MPa);

f_{ck} : Resistência característica à compressão (MPa).

O ensaio, segundo Neville (2016), é realizado carregando-se o prisma de concreto em dois pontos simétricos, localizados a 1/3 das extremidades do vão. As diretrizes do mesmo são padronizadas pela NBR 12.142 (ABNT, 2010). Os corpos de provas prismáticos, para a realização do referido ensaio, são padronizados pela NBR 5738 (ABNT, 2016). A referida norma ainda especifica o número de camadas e golpes durante o adensamento manual.

A NBR 12.142 (ABNT, 2010) estima o cálculo da resistência ensaiada de acordo com a Equação (23) para rupturas no terço médio e a Equação (24) para rupturas fora do mesmo.

$$f_{ct,f} = \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (23)$$

$$f_{ct,f} = \frac{3 \times F \times a}{b \times d^2} \quad (24)$$

Onde

$f_{ct,f}$: resistência característica à tração na flexão (MPa);

F: força máxima registrada no ensaio (N);

l: dimensão do vão entre apoios (mm);

d: altura média do corpo de prova (mm);

a: distância média da linha de ruptura na face tracionada ao apoio mais próximo.

Um estudo realizado por Brito, Almeida e Oliveira (2019), com concreto de pavimento rígido no estado do Ceará, obteve uma correlação entre a resistência à compressão e tração na flexão, conforme Equação (25).

$$f_{ct,f} = 0,902 f_{ck}^{0,52} \quad (25)$$

Onde

$f_{ct,f}$: resistência característica à tração na flexão (MPa);

f_{ck} : Resistência característica à compressão (MPa).

No caso de pavimentos rodoviários, o controle tecnológico é realizado conforme normas estabelecidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), conforme normas DNIT 47/2004 – ES (BRASIL, 2004a), DNIT 48/2004 (BRASIL, 2004b) e DNIT 49/2004 (BRASIL, 2004c). As mesmas preveem o mínimo de 6 exemplares para cada lote e a determinação da resistência características ($f_{ctm,est}$) ocorre conforme Equação (26).

$$f_{ctm,est} = f_{ctm28} - K \times S \quad (26)$$

Onde

f_{ctm28} : Resistência média do concreto à tração na flexão dos exemplares, aos 28 dias (MPa);

S: desvio padrão dos resultados (MPa);

K: Coeficiente de distribuição de Student.

O coeficiente supracitado é obtido através da Tabela 34, em função do número de exemplares (n).

Tabela 34 - Coeficiente de distribuição de Student

| AMOSTRAGEM VARIÁVEL | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| n | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 18 | 20 | 25 | 30 | 32 | >32 |
| K | 0,920 | 0,906 | 0,896 | 0,889 | 0,883 | 0,876 | 0,868 | 0,863 | 0,861 | 0,857 | 0,854 | 0,842 | 0,842 |

Fonte: BRASIL (2004a, 2004b, 2004c)

3.2.7. Massa específica

A densidade do concreto varia conforme o teor e massa específica dos agregados, quantidade de ar aprisionado, além das proporções de água e cimento que, por sua vez, dependem do tamanho máximo do agregado (KOSMATKA; WILSON, 2011). Os autores ainda citam que a redução no conteúdo de pasta de cimento ocasiona o aumento da densidade, devido ao crescimento no volume de agregados. No concreto produzido com agregados normais, esse parâmetro também sofre interferência do processo de adensamento empregado na sua fabricação, além de uma menor influência do ambiente no qual permanecem em virtude da variação no teor de água em seus poros (OLIVEIRA, 2008b).

A NBR 8953 (ABNT, 2015a) classifica o concreto, de acordo com sua massa específica seca, em concreto normal (C), concreto leve (CL) e concreto pesado (CP). No primeiro, o valor se encontra entre 2.000 e 2.800 kg/m³, enquanto o segundo e terceiro se encontram abaixo e acima dos valores supracitados, respectivamente (ABNT, 2015a).

O ensaio para a determinação da massa específica do concreto é padronizado pela NBR 9778 (ABNT, 2009d). Deverão ser analisadas, pelo menos, duas amostras de volume mínimo 1.500 cm³ para concretos com agregados de dimensão máxima igual ou inferior a 50 mm, e 10.000 cm³ para os demais casos (ABNT, 2009d). A referida norma define três tipos de massa específica: amostra seca (ρ_s), amostra saturada (ρ_{sat}) e real (ρ_r). A primeira e segunda

consistem na relação entre a massa do material seco e saturado, respectivamente, e o volume total da amostra, considerando-se os poros permeáveis e impermeáveis. A última refere-se à razão entre a massa do material seco e seu volume, eliminando os poros permeáveis. O resultado final é a média dos ensaios realizados em cada corpo de prova (ABNT, 2009d).

3.2.8. Absorção de água

A facilidade de penetração e movimentação de fluidos no interior do concreto, denominada permeabilidade, está diretamente relacionada à sua durabilidade (NEVILLE, 2016). O autor complementa que a propriedade mencionada se refere, basicamente, ao fluxo em um meio poroso. Kosmatka e Wilson (2011) definem a permeabilidade do concreto como a capacidade de transporte de água sob pressão ou seu potencial de resistir à penetração de água ou outras substâncias. Os mesmos também descreveram a estanqueidade como a capacidade do concreto de reter a água sem vazamentos visíveis.

Vale salientar que a água é a causa de muitos processos físicos e químicos de degradação em sólidos porosos, sendo este último devido à mesma ser o veículo de transporte de íons agressivos (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Eles complementam que tais fenômenos são controlados pela permeabilidade do sólido.

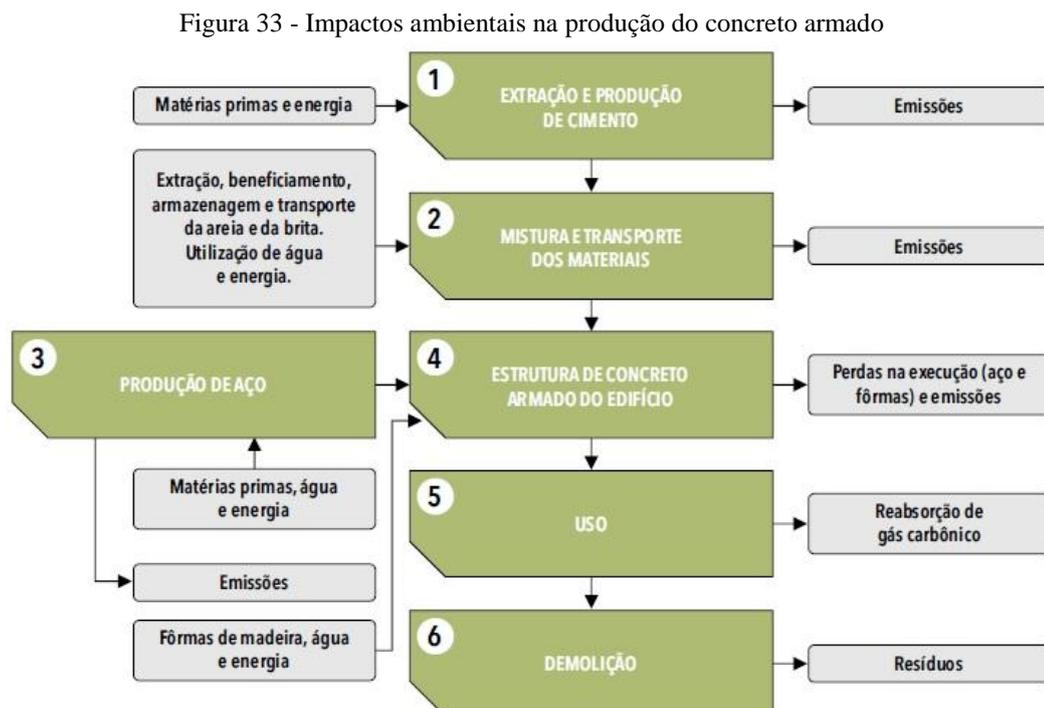
Os vazios no concreto são deixados por uma parcela da água que é perdida pelo processo de evaporação (GAMBHIR, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 1994). Mehta e Monteiro (1994) acrescentam a influência da água consumida na reação de hidratação do cimento. O aspecto da estrutura de poros em uma pasta de cimento endurecida é determinante para a permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 2016). Neville (2016) complementa que o sistema de poros relevante ocorre tanto no interior da pasta, quanto na sua interface com o agregado. O autor ainda cita que a interface é o ponto de início da fissuração dos concretos nas primeiras idades.

A porosidade do concreto é uma característica que interfere diretamente na sua resistência mecânica (BATEZINI, 2013; PEREIRA, 2011). Sua redução contribui para o crescimento da resistência à compressão (LEITE, 2018). O volume de poros no concreto é medido pela absorção que, por sua vez, é aferida pela secagem de um corpo de prova seguida de imersão em água e verificação do crescimento de massa em percentual da massa seca (NEVILLE, 2016). O autor ainda menciona o pouco uso do ensaio de absorção, exceto para o controle de qualidade em produtos pré-fabricados, peças para pavimentação, lajes e meio-fios.

O procedimento para realização do ensaio é estabelecido pela NBR 9778 (ABNT, 2009d), onde é definida a absorção de água por imersão (A) e o índice de vazios (I_v). O primeiro parâmetro é determinado pelo “incremento de massa em um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco”. A segunda propriedade consiste na “relação entre o volume de poros permeáveis e o total da amostra”. Os padrões de amostras e a obtenção do resultado final são os mesmos descritos no item 3.2.7.

3.2.9. Impactos Ambientais

A sua produção demanda diversos impactos ambientais, diretos e indiretos. Na fabricação dos seus insumos são consumidos recursos não renováveis, além de água e energia, ocorrência de emissões atmosféricas, bem como o surgimento de áreas degradadas, além da geração de diversas classes de resíduos. Durante a produção e/ou lançamento do concreto no canteiro de obras, além do consumo de água e energia, bem como das emissões atmosféricas, também há a geração de resíduos inertes, sendo estes aptos para reciclagem. No fluxograma da Figura 33 estão descritos alguns dos impactos ambientais inerentes à produção do concreto armado, desde a extração da matéria prima até a sua demolição, após o fim da vida útil da edificação, de acordo com Bento e Rossignolo (2013).



Fonte: Bento e Rossignolo (2013)

Devido ao mercado da construção civil ser o maior demandante de areia no país, tendo consumido 68,96% do total bruto extraído no ano de 2009, sendo empregados diretamente nos canteiros de obra; além do consumo indireto, sendo utilizado na construção/manutenção de estradas, pavimentação asfáltica, aterros, comércio de materiais, indústrias de artefatos de cimento e concreto, cerâmica vermelha, cimento, argamassas e concreto para construção, representando 13,29% da produção bruta, conforme dados do DNPM (BRASIL, 2010). Sendo assim, observa-se que o setor utilizou 82,25% da quantidade demandada no ano supracitado. Desse modo, observa-se que a extração de areia é um dos setores de maior contribuição para a ocorrência de impactos ambientais causados pela construção civil, principalmente pela utilização do concreto.

Um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) realizado por Souza (2012), em uma mineradora no estado de pequeno porte no estado de São Paulo, estimou, por metro cúbico de areia, um consumo de recursos naturais superior a 650 kg e emissões acima de 400 kg, sendo elas atmosféricas, para a água e solo. Os recursos naturais descritos pelo autor foram águas superficiais, diesel e óleo cru.

Lima, Fernandes e Dantas (2018) encontraram um valor estimado superior a 380 kg de CO₂ emitidos referentes ao uso da areia, onde foi considerado todo o seu processo de produção, para uma habitação modelo de alvenaria, com 80 m² de área.

Nobre Filho *et al.* (2011) encontrou 29 impactos ambientais de caráter adverso em um rio localizado no estado do Ceará, devido à extração de areia. Entre os impactos citados pelos autores, se encontram alterações geomorfológicas do terreno, assoreamento, supressão de vegetação, emissão de poeiras, entre outros.

Thorneycroft *et al.* (2018) verificou dez misturas de resíduos plásticos inseridas em um traço concreto estrutural, com uma taxa de substituição da areia, onde duas delas apresentaram alteração positiva no ensaio de resistência à compressão e seis na resistência à tração, tendo concluído que o resíduo de PET triturado é uma alternativa viável à areia.

Karthikeyan *et al.* (2019) encontrou pequenas reduções na resistência à compressão, tração e flexão para uma taxa de substituição de 10% de resíduo plástico na massa total da mistura. O autor ainda afirma que as expansões percentuais dos materiais com substituição parcial de plástico se encontram dentro dos limites permitidos, sendo segura para sua utilização para fins de construção.

Na pesquisa realizada por Schettino (2015), incorporando-se fibras de PET em corpos

de prova de concreto, observou-se o crescimento da resistência à tração por compressão diametral, apesar de ter reduzido consideravelmente a resistência à compressão axial. O autor ressalta que foi possível obter uma faixa de aplicação onde há equilíbrio entre as resistências à tração e compressão.

Nesse contexto, observa-se um potencial de utilização dos resíduos oriundos do processamento de lentes oftálmicas na produção de concreto de cimento Portland.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo divide-se em dois subitens. O primeiro descreve a tipologia da pesquisa realizada. O segundo apresenta a metodologia experimental, que abrange a caracterização dos componentes do concreto, sua dosagem, produção, moldagem dos corpos de prova e realização ensaios destrutivos e não destrutivos no concreto. Além disso, neste tópico, também são abordados os métodos de obtenção dos resultados e de análise.

4.1. TIPOLOGIA DA PESQUISA

Devido à escassez de estudos referentes aos resíduos de processamento de lentes oftálmicas, realizou-se um estudo exploratório, realizado em análise de temas ou problemas pouco estudados (SAMPIERI *et al.*, 2013). Tal técnica de pesquisa tem por finalidade: desenvolver hipóteses; ampliar o entendimento do pesquisador com o objeto de estudo, para se desenvolver uma pesquisa mais precisa futuramente; e a modificação e o esclarecimento de conceitos (MARCONI; LAKATOS, 2021).

Os dados foram coletados de maneira experimental, sendo àquela em que o pesquisador trabalha com variáveis independentes e dependentes, sempre envolvendo algum tipo de experimento, geralmente realizada em laboratórios (ZANELLA, 2011). Variáveis independentes são manipuladas pelo pesquisador, enquanto as variáveis dependentes sofrem influência desta manipulação (MARCONI; LAKATOS, 2021; ZANELLA, 2011). Os experimentos desta pesquisa consistem nos ensaios de caracterização do concreto e do resíduo coletado.

A análise dos dados foi realizada de maneira quantitativa, que observou a influência do teor de resíduo (variável independente) sobre o resultado dos ensaios no concreto (variável dependente). As pesquisas quantitativas são caracterizadas pelo uso de ferramentas estatísticas com o propósito de aferir as relações entre as variáveis, onde o pesquisador baseia-se em um plano pré-determinado com hipóteses e variáveis claramente definidas (ZANELLA, 2011).

Além disso, foi realizada uma análise qualitativa para a interpretação dos espectros de infravermelho dos resíduos. O referido procedimento busca obter dados transformados em informação e conhecimento, e a coleta dos mesmos ocorre simultaneamente a sua interpretação (SAMPIERI *et al.*, 2013).

4.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Inicialmente foram obtidas as propriedades químicas e físicas dos resíduos estudados. Posteriormente, realizou-se a caracterização dos componentes empregados no concreto produzido, onde os dados foram utilizados como parâmetro para estudo de dosagem. Sucessivamente, foi produzido o concreto, com a execução do ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) e da moldagem dos corpos de prova, seguido da cura úmida durante 28 dias. Subsequentemente, procedeu-se a realização dos ensaios destrutivos de resistência à compressão e à tração na flexão; bem como os ensaios não destrutivos, referentes à absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Com exceção da caracterização química dos resíduos e da resistência a tração na flexão, os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Tecnologia Rural da UFRPE (DTR/UFRPE).

4.2.1. Caracterização química e física do resíduo

Foram coletados dois tipos de resíduo de um laboratório óptico localizado em Recife/PE, sendo eles o policarbonato e a resina que, de acordo com os responsáveis pelo setor, representam a maior parte da produção de lentes pela empresa. A atividade da mesma consiste no processamento de lentes a partir de blocos semiacabados ou acabados.

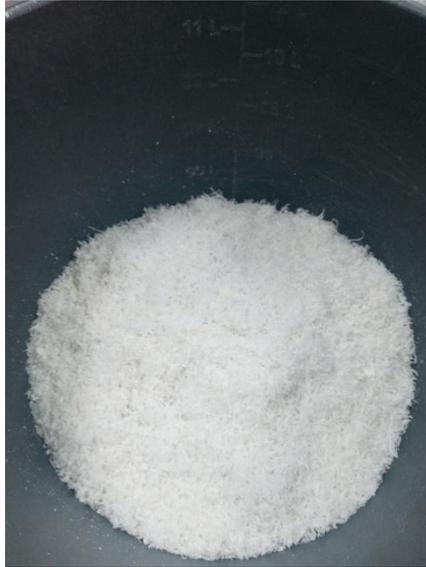
Encaminhou-se uma amostra de cada resíduo, para o Laboratório Multiusuário de Análises Químicas (LABMAQ) da UFRPE, onde foi realizada a sua caracterização química através de ensaios de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Foi empregado o método de refletância total atenuada (ATR), gerando-se espectros a uma faixa de 4.000 a 600 cm^{-1} . Foi utilizado um espectrofotômetro da marca Shimadzu[®], modelo IRTacer-100, ilustrado na Figura 34. Os resíduos estão ilustrados na Figura 35 e na Figura 36.

Figura 34 - Espectrofotômetro FTIR utilizado no ensaio



Fonte: Shimadzu Corporation[®] (2017)

Figura 35 - Policarbonato



Fonte: Autor

Figura 36 - Resina



Fonte: Autor

Subsequentemente, foram separadas quatro amostras de cada resíduo. Um estudo realizado por Lins *et al.* (2012) a respeito da produção de biofilme em polímeros, constatou que a secagem em temperatura de 50°C é suficiente para evitar seu desenvolvimento nos materiais. Os autores ainda citam que o biofilme consiste em um ecossistema estruturado que atua de maneira coordenada e degrada o polímero, o transformado em monômeros isolados. Desse modo, as amostras foram secas em estufas a uma temperatura média de 50°C até massa constante, atingida em 48 horas. O teor de umidade foi determinado através de pesagem das amostras antes e após a secagem, calculando-a conforme Equação (27), descrita na NBR 6467 (ABNT, 2006b). As cápsulas com as amostras de resíduo para a determinação do teor de

umidade se encontram na Figura 37.

$$h = \frac{m_i - m_f}{m_f - m_c} \times 100 \quad (27)$$

Onde

h: teor de umidade (%)

m_i : massa inicial da cápsula com o material em ensaio (g);

m_f : massa após a secagem da cápsula com o material em ensaio (g);

m_c : massa da cápsula (g).

Figura 37 - Cápsulas com resíduos em secagem na estufa



Fonte: Autor

Além disso, foram determinadas as massas unitárias dos resíduos, em um recipiente com capacidade de 12 litros, aferido de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006a), conforme Figura 38. O cálculo foi realizado conforme Equação (28), também constante na norma supracitada.

$$\rho_r = \frac{m_{rr} - m_r}{V} \quad (28)$$

Onde

ρ_r : massa unitária (kg/m^3);

m_{rr} : massa do recipiente + resíduo (kg);

m_r : massa do recipiente vazio (kg);

V: volume do recipiente (m^3).

Figura 38 - Recipiente para aferição da massa unitária dos resíduos



Fonte: Autor

4.2.2. Amostragem e caracterização dos componentes do concreto

O cimento Portland foi doado pelo fabricante, mencionado no item 4.2.2.1. Os demais componentes do concreto estudado (areia e brita) foram adquiridos no comércio local, mediante as especificações comumente empregadas na região.

4.2.2.1. Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CII Z-32, com classe de resistência igual a 32 MPa, aos 28 dias de idade. O fabricante do material é a empresa Elizabeth Cimentos, localizada na cidade de Alhandra/PB. A escolha da referida especificação motivou-se pelo seu desempenho satisfatório na produção de concreto, conforme estudos indicados no item 3.2.1. Além disso, o cimento Portland composto (CP II) é o mais consumido no Brasil, conforme dados do IBGE (BRASIL, 2021), também citados no item mencionado.

Sua massa específica foi determinada de acordo com a NBR 16.605 (ABNT, 2017), usando-se o frasco de Le Chatelier, ilustrado na Figura 39, com a introdução de xileno, sendo esse um líquido não reagente com o cimento, conforme indicado pela referida norma. O ensaio foi realizado com amostras de 60g de cimento, onde foram realizadas leituras volumétricas no recipiente, antes e após a introdução do material, respeitando-se as disposições normativas. A massa específica foi calculada conforme Equação (29).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (29)$$

Onde

ρ : massa específica do material (g/cm^3);

m : massa do material ensaiado (g);

V : volume deslocado pela massa do material ensaiado, referente à diferença das leituras antes e após a inserção do mesmo (cm^3).

Figura 39 - Frasco de Le Chatelier



Fonte: Autor

A massa unitária foi determinada conforme procedimento realizado por Cunha (2020) e Silva (2021), diante da ausência de uma padronização normativa. Utilizou-se uma proveta graduada de 100 ml, conforme Figura 40. Primeiramente foi realizada a pesagem da proveta vazia, onde posteriormente adicionou-se água até a marca de 100 ml, aferindo-se a massa do conjunto. Em seguida realizou-se a secagem do frasco e adicionou-se cimento, compactando-se a amostra na frequência de 10 Hz por dois minutos, até a marca de 100 ml, pesando-se o conjunto. A massa unitária foi calculada pela Equação (30).

$$\rho_c = \frac{m_{fc} - m_f}{m_{fa} - m_f} \times 1.000 \quad (30)$$

Onde

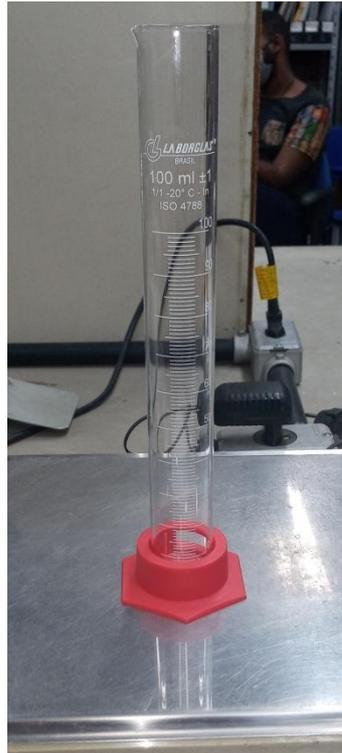
ρ_c : massa unitária do cimento (kg/m^3);

m_{fc} : massa do frasco e do cimento (kg);

m_{fa} : massa do frasco e da água (kg);

m_f : massa do frasco vazio (kg).

Figura 40 - Proveta graduada



Fonte: Autor

4.2.2.2. Agregado miúdo

Para o agregado miúdo, obteve-se o teor de umidade, massa específica e massa unitária dos agregados, bem como sua a composição granulométrica, com a determinação do seu módulo de finura e dimensão máxima característica.

A massa específica foi determinada conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009a), com o preparo de 1 kg de amostra. O ensaio é realizado com 500g da mesma, com o uso de um frasco aferido, conforme Figura 41. As massas específicas do agregado miúdo foram calculadas pelas Equações (31), (32), (33) e (34).

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (31)$$

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (32)$$

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (33)$$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (34)$$

Onde

d_1 : massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

d_2 : massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3);

d_3 : massa específica do agregado (g/cm^3);

V : volume do frasco (cm^3);

V_a : volume de água adicionada ao frasco (cm^3);

m : massa da amostra seca em estufa (g);

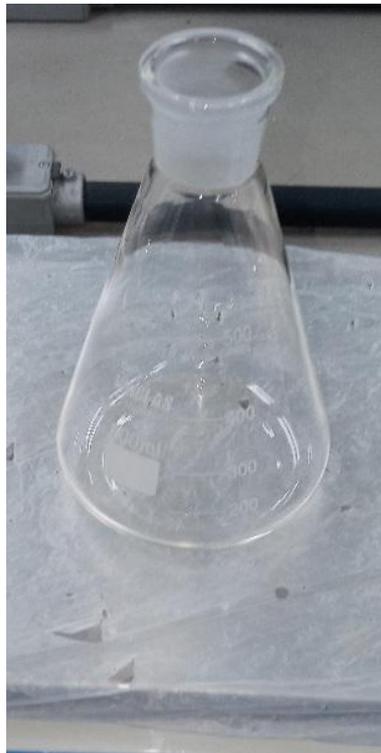
m_1 : massa do conjunto frasco + agregado (g);

m_2 : massa do frasco + agregado + água (g);

m_s : massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

ρ_a : massa específica da água (g/cm^3).

Figura 41 - Frasco aferido usado na determinação da massa específica da areia



Fonte: Autor

A massa unitária foi determinada de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006a), utilizando-se um recipiente aferido com volume aproximado de 12,84 l. A massa específica da água é determinada em função da sua temperatura, obtida na Tabela 35, interpolando-se, caso necessário. O volume do recipiente é calculado dividindo-se a massa de água suficiente para enchê-lo pela massa específica.

Tabela 35 - Massa específica da água

| Temperatura (°C) | Massa específica (kg/m ³) |
|------------------|---------------------------------------|
| 15,6 | 999,01 |
| 18,3 | 998,54 |
| 21,1 | 997,97 |
| 23,0 | 997,54 |
| 23,9 | 997,32 |
| 26,7 | 996,59 |
| 29,4 | 995,83 |

Fonte: ABNT (2006)

Para a determinação da massa unitária solta, foi empregado o método “C” constante na norma supracitada, que consiste no enchimento do recipiente até seu transbordamento, a uma altura não superior a 50 mm acima de sua borda superior. Desse modo a massa unitária foi obtida conforme Equação (35).

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (35)$$

Onde

ρ_{ap} : massa unitária do agregado (kg/m³);

m_{ar} : massa do recipiente + agregado (kg);

m_r : massa do recipiente vazio (kg);

V: volume do recipiente (m³).

O teor de umidade foi determinado por meio do frasco de Chapman, ilustrado na Figura 42, com amostras de 500g, conforme padronização da NBR 9775 (ABNT, 2011a). O teor de umidade foi calculado através da Equação (36).

$$h = \frac{[500 - (V - 200) \times \gamma]}{(V - 700) \times \gamma} \quad (36)$$

Onde

h: teor de umidade superficial, referente à condição de saturada superfície seca (SSS), expresso em percentual;

V: Leitura do frasco de Chapman (ml);

γ : densidade referente à condição SSS (g/ml).

Figura 42 - Frasco de Chapman



Fonte: Autor

O ensaio para obtenção da composição granulométrica foi realizado conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), com amostras de 300g de areia seca em estufa. A agitação do conjunto foi realizada a uma frequência de 10hz, durante 10 minutos. Posteriormente, foram pesadas as quantidades retidas em cada peneira, calculando-se as porcentagens média, retidas e acumuladas em cada uma. O módulo de finura foi calculado conforme definição da NBR 7211 (ABNT, 2009c), descrita no item 3.2.2.

4.2.2.3. Agregado graúdo

Em relação ao agregado graúdo, determinaram-se a massa específica, absorção de água, massa unitária, teor de umidade e granulometria, dela obtendo-se a sua dimensão máxima característica.

A massa específica e absorção de água foram determinadas conforme NBR NM 53 (ABNT, 2009b), com 3 kg de amostra. As massas específicas e absorção do agregado graúdo foram calculadas de acordo com as Equações (37), (38), (39) e (40).

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (37)$$

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (38)$$

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (39)$$

$$A = \frac{m_s - m}{m} \quad (40)$$

Onde

d: massa específica do agregado seco (g/cm^3);

d_s : massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3);

d_a : massa específica aparente do agregado seco (g/cm^3);

A: absorção de água (%);

m: massa ao ar da amostra seca (g);

m_a : massa em água da amostra (g);

m_s : massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g).

A massa unitária da brita foi obtida através do mesmo procedimento realizado para o agregado miúdo, descrito no item 4.2.2.2.

O teor de umidade total foi determinado de acordo com o ensaio descrito na NBR 9939 (ABNT, 2011c), onde foi utilizada uma amostra com 3,78 kg de brita. O teor de umidade foi calculado através da Equação (41).

$$h = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad (41)$$

Onde

h: teor de umidade (%)

m_i : massa inicial da amostra (g);

m_f : massa final da amostra seca (g).

O ensaio de composição granulométrica do agregado graúdo foi realizado conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), descrito no item 4.2.2.2. Entretanto, foram utilizados 5 kg do material, fracionado em três etapas. A dimensão máxima característica foi obtida conforme definição da NBR 7211 (ABNT, 2009c), descrita no item 3.2.2.

4.2.3. Dosagem do concreto

Foi produzido um concreto padrão de classe C30, conforme NBR 8953 (ABNT, 2015a), com resistência característica à compressão de 30 MPa aos 28 dias de moldagem. O estudo de dosagem foi realizado a partir do método proposto pela ABCP (RODRIGUES, 1995), devido a este apresentar resultados satisfatórios nas pesquisas citadas no item 3.2.3, definindo-se um traço padrão. Para a definição do desvio padrão (S_d), foi considerada a condição A de preparo do concreto, estabelecida na NBR 12.655 (ABNT, 2015b), devido aos materiais terem sido aferidos em massa, com o seu valor em 4,0 MPa, indicado na Tabela 19. Inserindo-se o desvio padrão na Equação (1), definida na referida norma, a resistência média de dosagem (f_{cm28}) encontrada foi de 36,60 MPa. Lançando-se tal valor no gráfico da Figura 21, encontrou-se uma relação água/cimento (a/c) de 0,44. Também foi estabelecido o abatimento entre os valores da classe S50, entre 50 e 100 mm, conforme Tabela 28, definida pela NBR 8953 (ABNT, 2015a). Segundo a referida norma, concretos nessa faixa de consistência podem ser aplicados em alguns tipos de pavimento e fundações. Considerando uma margem de segurança, o estudo de dosagem foi realizado com um abatimento fixado em 50 ± 10 mm.

4.2.4. Identificação dos traços

No traço padrão obtido pelo estudo de dosagem supracitado, serão incorporados os resíduos de policarbonato e resina, substituindo-se a areia nas proporções de 2%, 6% e 10% em volume. Referente aos resíduos incorporados, foram empregadas as letras “P” para identificar o policarbonato e “R” para a resina. O traço padrão foi denominado T-0, enquanto

os demais foram nomeados de acordo com cada percentual de substituição da areia, conforme Tabela 36.

Tabela 36 - Identificação dos traços

| Identificação do Traço | Tipo de Resíduo | Teor de Resíduo |
|------------------------|-----------------|-----------------|
| T-0 | - | 0 |
| T _P -2% | Policarbonato | 2% |
| T _P -6% | | 6% |
| T _P -10% | | 10% |
| T _R -2% | Resina | 2% |
| T _R -6% | | 6% |
| T _R -10% | | 10% |

Fonte: Autor

4.2.5. Mistura do Concreto

Os procedimentos de mistura do concreto em laboratório seguiram a norma NBR 12.821 (ABNT, 2009e). A mistura foi realizada em betoneira de 120 litros, adicionando-se inicialmente a brita e aproximadamente 1/3 da água de amassamento, deixando o equipamento em funcionamento por trinta segundos, então se colocou o cimento e mais 1/3 da água de amassamento; após mais trinta segundos, inseriu-se o agregado miúdo e o restante da água, deixando então a betoneira em funcionamento até o concreto apresentar homogeneidade e trabalhabilidade adequadas, em torno de 4 minutos.

4.2.6. Moldagem e Cura de Corpos de Prova

A preparação das fôrmas e a moldagem dos corpos-de-prova seguiram o que determina a norma NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram produzidos corpos de prova cilíndricos nas dimensões $\phi 10 \times 20$ cm e prismáticos com dimensões 10 x 10 x 35 cm. Os primeiros foram utilizados no ensaio de resistência à compressão e absorção de água, enquanto os segundos foram empregados no ensaio de resistência à tração na flexão.

Inicialmente, foi realizada a lubrificação das fôrmas utilizando-se óleo mineral para os moldes cilíndricos, metálicos, e desmoldante para concreto nos moldes prismáticos, confeccionados em madeira. A moldagem foi realizada com adensamento manual respeitando-se o número de camadas e golpes especificados pela referida norma, eliminando-se o material em excesso na última camada.

Após a moldagem, esperou-se o período de um dia para desforma dos corpos-de-prova

cilíndricos e dois dias para os prismáticos. Depois de desmoldados, todos os corpos-de-prova foram imersos em um reservatório de água, permanecendo até 28 dias após moldagem, quando se realizaram os ensaios destrutivos de resistência à compressão e à tração na flexão.

4.2.7. Número de corpos de prova

A quantidade de corpos de prova foi estimada de modo a atender os ensaios destrutivos, de absorção de água, índice de vazios e massa específica, bem como um quantitativo deixado para reserva, no caso de uma eventual necessidade. Desse modo, foram produzidos 26 corpos de provas cilíndricos e 14 prismáticos para o traço padrão. Para os traços com resíduo incorporado, foram moldados 18 unidades cilíndricas e 14 prismáticas para cada tipo de resíduo. No total, foram obtidas 232 amostras, onde 178 delas foram empregadas nos ensaios. Na Tabela 37 estão descritos todos os quantitativos moldados.

Tabela 37 - Quantitativo de corpos de prova moldados

| Formato | Ensaio | Traço | | | | | | Total | |
|------------|---|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------|---------------------|
| | | T-0 | T _P -2% | T _R -2% | T _P -6% | T _R -6% | T _P -10% | | T _R -10% |
| Cilíndrico | Resistência à compressão | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 80 |
| | Absorção de água/Índice de Vazios/ Massa Específica | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 28 |
| | Reserva | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 26 |
| Prismático | Resistência à tração na flexão | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 70 |
| | Reserva | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 28 |

Fonte: Autor

4.2.8. Ensaio de abatimento de tronco de cone

Com o concreto ainda fresco, ao final de cada betonada, será realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme procedimento especificado na NBR NM 67 (ABNT, 1998), com a finalidade de se observar a sua consistência, que afeta diretamente a trabalhabilidade. Sua aferição foi expressa em milímetros, em concordância com o orientado pela norma supramencionada, considerando-se a distância da régua posicionada na parte superior do molde ao eixo da amostra. O molde utilizado nos ensaios se encontra na Figura

43.

Figura 43 - Molde usado para o ensaio de abatimento



Fonte: Autor

4.2.9. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os referidos ensaios aplicados seguiram as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2009d). Foram utilizados quatro corpos de prova para cada ensaio devido à recomendação do normativo referenciado anteriormente, mencionado no item 3.2.7. Os parâmetros mencionados foram determinados pelas médias dos resultados individuais de cada ensaio, conforme especificado pela norma supracitada. A absorção de água e o índice de vazios foram obtidos pelas Equações (42) e (43), respectivamente, enquanto as massas específicas foram calculadas pelas Equações (44), (45) e (46).

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (42)$$

$$I = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (43)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 1000 \quad (44)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}}}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 1000 \quad (45)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \times 1000 \quad (46)$$

Onde

A: absorção (%);

I: índice de vazios (%);

ρ_s : massa específica da amostra seca (g/cm³);

ρ_{sat} : massa específica da amostra saturada (g/cm³);

ρ_r : massa específica real (g/cm³);

m_{sat} : massa da amostra saturada;

m_s : massa da amostra seca em estufa;

m_i : massa da amostra saturada imersa.

4.2.10. Ensaio de resistência à compressão

O rompimento dos corpos de prova cilíndricos para verificação da resistência à compressão ocorreu conforme diretrizes da NBR 5739 (ABNT, 2018a).

Foi utilizada uma prensa manual com indicador digital, calibrada em 04/09/2020, conforme Figura 44. Primeiramente, foi realizado o lixamento das faces dos corpos de prova e realizadas as medições dos diâmetros com auxílio de um paquímetro. Em seguida, os mesmos foram encaixados em dois cabeçotes e discos de neoprene em cada face, sendo dessa maneira inseridos na prensa, centralizados no prato inferior. Logo após, fechou-se a cabine e aplicou-se a carga acionando manualmente a haste do injetor que realiza a medição da carga por um transdutor de pressão, apresentando o maior resultado no indicador digital após o rompimento do corpo de prova.

Figura 44 - Prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão



Fonte: Autor

A resistência à compressão de cada corpo de prova cilíndrico foi obtida através da Equação (15), conforme estabelecido pela norma técnica supramencionada.

Para cálculo da resistência característica à compressão, cada traço foi considerado como um lote. Como foram moldados corpos de prova de todas as betonadas, caracteriza-se o controle por amostragem total que, de acordo com a NBR 12.655 (ABNT, 2015b), é descrito como àquele em que “todas as betonadas são amostradas e representadas por um exemplar que define a resistência à compressão daquele concreto naquela betonada”. A mesma ainda determina que um exemplar deva ser composto por dois corpos de prova da mesma amassada, para cada idade de rompimento, sendo considerada a resistência do exemplar o maior dos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão.

A resistência característica à compressão foi calculada conforme Equação (18) para o traço T-0 e pela Equação (19) para os demais, devido ao número de exemplares de cada um, adequando-se aos parâmetros da NBR 12.655 (ABNT, 2015b). Além disso, foram analisadas as resistências máxima, mínima, média e o desvio padrão das amostras.

4.2.11. Ensaio de resistência à tração na flexão

O rompimento dos corpos de prova prismáticos para verificação da resistência à tração na flexão ocorreu conforme diretrizes da NBR 12.142 (ABNT, 2010).

Os ensaios foram realizados em uma empresa de engenharia localizada em Recife/PE, atuante na área de tecnologia do concreto. Foi utilizado um dispositivo de flexão acoplado à prensa, conforme Figura 45.

Figura 45 - Prensa com dispositivo para tração na flexão, usada nos ensaios.



Fonte: Autor

A resistência à tração na flexão de cada unidade rompida foi determinada através das Equações (23) e (24), para rupturas ocorridas dentro e fora do terço médio, respectivamente, conforme indicado na norma mencionada acima.

Os lotes foram definidos do mesmo modo que os corpos de prova cilíndricos, conforme descrito no item 4.2.10. Entretanto, resistência característica à tração foi calculada conforme Equação (26), de acordo com as normas do DNIT (BRASIL, 2004a, 2004b, 2004c). Também foram analisadas as resistências máxima, mínima, média e o desvio padrão das amostras.

4.2.12. Análise dos resultados

Foi realizado o teste de Tukey para as médias das resistências à compressão e tração, além da absorção de água, índice de vazios e massa específica, para observação da significância das suas variações. O referido procedimento foi realizado através do software gratuito Sisvar[®]. De acordo com o estudo realizado por Borges e Ferreira (2003) o teste de Tukey, junto com o SNK, apresentou controle da taxa de erro por comparação, sendo essas muito menores que o valor nominal do nível de significância. Sousa, Lira Júnior e Ferreira

(2012) observaram que o teste de Tukey possui maior poder de controle do erro tipo I, que consiste em encontrar diferenças inexistentes entre tratamentos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

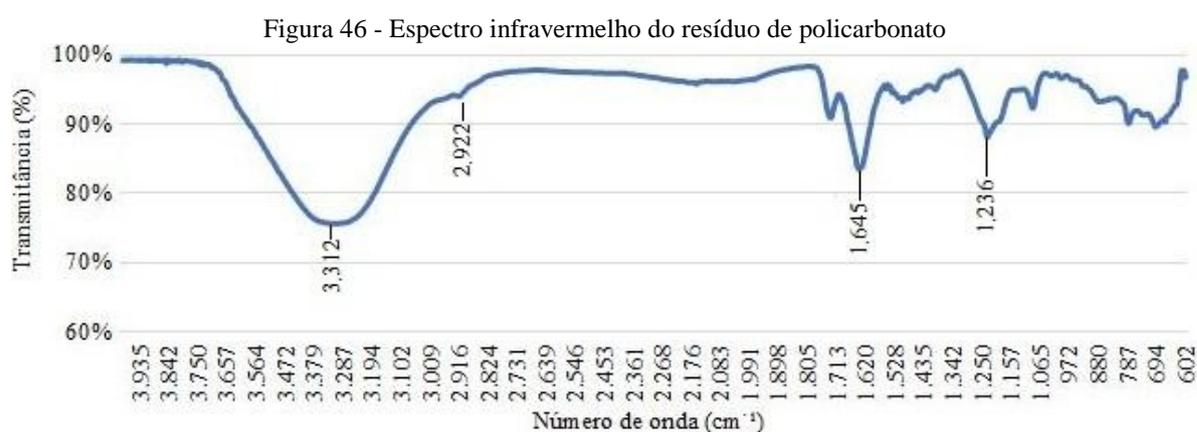
Este capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios realizados, bem como sua análise. Primeiramente são realizadas as caracterizações químicas e físicas dos resíduos utilizados e, posteriormente, determinadas as propriedades dos componentes do concreto. Em seguida, foi realizado o processo de dosagem e a apresentação do traço do concreto padrão. No concreto fresco foi analisada sua trabalhabilidade. No concreto endurecido, foram avaliadas a resistência à compressão, tração na flexão, absorção de água, índice de vazios e massa específica.

5.1. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DOS RESÍDUOS

A caracterização química foi realizada através do ensaio de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), conforme descrito no item 4.2.1. Além disso, foi determinada a massa unitária, necessária para o cálculo do volume de resíduo a ser inserido no concreto, e o teor de umidade, fundamental na determinação do volume de água a ser descontado durante a introdução de água na mistura do concreto.

5.1.1. Espectro infravermelho do resíduo de policarbonato

Após a realização do procedimento descrito no item 4.2.1, foi obtido espectro ilustrado na Figura 46.



Em sua análise, a banda larga com pico em 3.312 cm^{-1} caracteriza a presença do grupo O–H com ligação de hidrogênio. O pico presente em 1.645 e 1.236 cm^{-1} indicam a existência de ligações C=C e C–O, respectivamente. Por último, observamos o pico em 2.922 cm^{-1} ,

sobreposto pelo pico O–H, que evidencia a presença da ligação C–H alifática. Segundo Pavia *et al.* (2015), em álcoois e fenóis, a presença de O–H com ligação de hidrogênio é indicada pela ocorrência de banda larga próxima a $3.400\text{--}3.300\text{ cm}^{-1}$, confirmado com a existência de C–O, através de um estiramento ocorrido entre $1.300\text{--}1.000\text{ cm}^{-1}$. Quanto às ligações duplas, o autor afirma que as ligações C=C têm origem com uma banda fraca próxima a 1.650 cm^{-1} , e que a ligação C–H alifática é caracterizada por picos de frequência com valores inferiores a 3.000 cm^{-1} .

Ressalta-se que a presença do grupo O–H pode indicar uma possível presença de íons hidroxila (OH^-) no resíduo, quando em contato com água, penetrável por meio dos poros do concreto. Segundo Bertolini (2010), alguns tipos de agregado podem reagir com o referido íon, entre outros, gerando compostos expansivos que degradam o concreto. Tal fenômeno é denominado reação álcali-agregado, pois esses íons se encontram dissolvidos na solução de poros da matriz cimentícia (BERTOLINI, 2010).

5.1.2. Espectro infravermelho do resíduo de resina

Após a realização do procedimento descrito no item 4.2.1, foi obtido o espectro ilustrado na Figura 47.



O pico ocorrido em 1.736 cm^{-1} evidencia a presença do grupo carbonila (C=O), devido a sua intensidade, apresentando-se dentro da região indicada por Pavia *et al.* (2015), citada no item 3.1.4.2. A banda larga em 3.358 cm^{-1} é indicativa da existência de O–H, conforme faixa de valores indicada pelo referido autor e citada no item mencionado anteriormente. A presença das ligações C=C e C–O são sinalizadas pelos picos em 1.645 e 1.234 cm^{-1} , respectivamente. Ao mesmo modo do espectro apresentado no item 5.1.1,

observa-se um pico em 2.961 cm^{-1} , sobreposto pela banda O–H, que pode ser atribuído à ligação C–H alifática. O indicativo das ligações C=C e C–H alifática se encontram justificados no item anterior. Quanto a ligação C–O, Pavia *et al.* (2015) afirma que, em ácidos carboxílicos, seu estiramento ocorre na faixa de $1.320\text{-}1.210\text{ cm}^{-1}$.

Vale salientar que os ácidos carboxílicos, segundo Bettheim *et al.* (2012), são mais solúveis em água comparados a outros compostos de massa molecular semelhante. Os mesmos autores mencionam substâncias pertencentes ao referido grupo, onde o pH varia entre 1,9 e 3,2. Além disso, McMurry (2016) cita que são encontrados ácidos carboxílicos na forma dissociada em meios orgânicos com pH típico de 7,3. Entretanto vale salientar que a norma DIN 430 (1991 apud RIBEIRO, 2018) considera ácidos com grau muito forte de ataque ao concreto aqueles de pH inferior a 4,5. A mesma ainda considera ácidos com grau de ataque forte aqueles de pH entre 5,5 e 4,5; e fraco com valores entre 6,5 e 5,5.

Quanto à presença do grupo OH, são válidas as mesmas considerações mencionadas no item anterior.

5.1.3. Determinação do teor de umidade

Após os procedimentos e cálculos realizados conforme descrito no item 4.2.1, foram obtidos os valores indicados na Tabela 38 e na Tabela 39, abaixo. Além disso, foram calculados a umidade média ($h_{\text{médio}}$) e o desvio padrão (S) das amostras de ambos os resíduos.

Tabela 38 - Umidades das amostras de policarbonato

| | | | | |
|-----------------------------------|---------|---------|----------------------|---------|
| m_c = Cápsula (g) | 430,00 | 286,00 | 430,00 | 286,00 |
| m_i = m_c + resíduo úmido (g) | 490,00 | 322,00 | 475,00 | 332,00 |
| m_f = m_c + resíduo seco (g) | 449,00 | 300,00 | 442,00 | 300,00 |
| h = Umidade (%) | 215,79% | 157,14% | 275,00% | 228,57% |
| | | | $h_{\text{médio}}$ = | 219,13% |
| | | | S = | 48,53% |

Fonte: Autor

Tabela 39 - Umidades das amostras de resina

| | | | | |
|-----------------------------------|---------|---------|----------------------|---------|
| m_c = Cápsula (g) | 148,00 | 80,00 | 149,00 | 81,00 |
| m_i = m_c + resíduo úmido (g) | 381,00 | 216,00 | 415,00 | 204,00 |
| m_f = m_c + resíduo seco (g) | 246,00 | 137,00 | 258,00 | 133,00 |
| h = Umidade (%) | 137,76% | 138,60% | 144,04% | 136,54% |
| | | | $h_{\text{médio}}$ = | 139,23% |
| | | | S = | 3,31% |

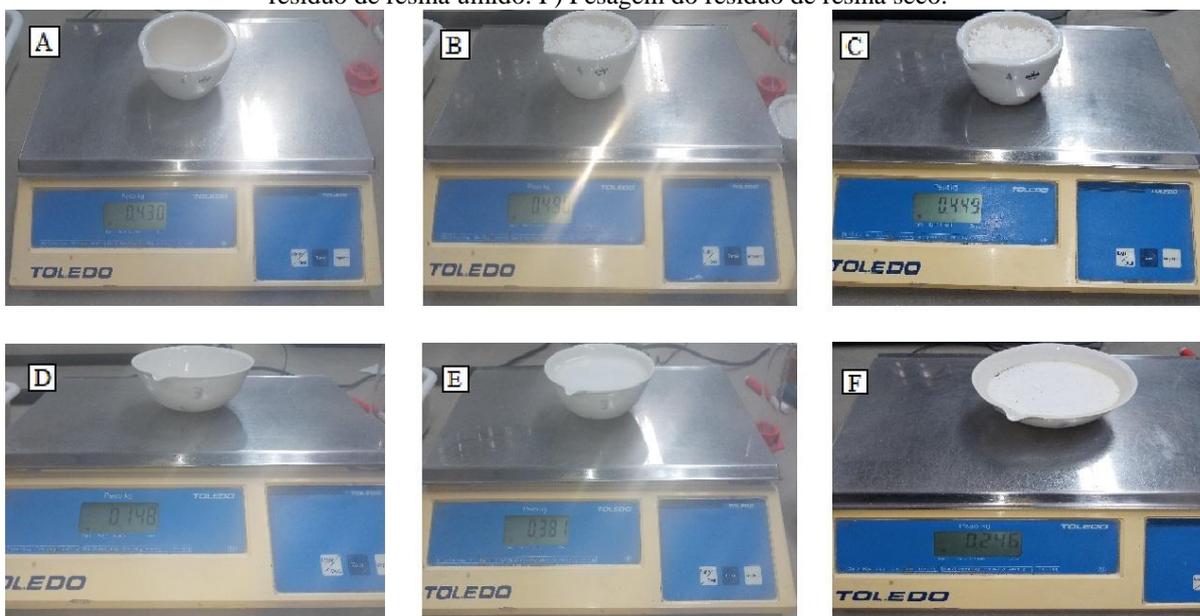
Fonte: Autor

Vale salientar que, segundo Martins e Domingues (2011), o desvio padrão reflete a variação média absoluta dos dados em torno da média aritmética. Devido à maior dispersão encontrada na umidade das amostras de policarbonato, com desvio padrão de 48,53%, optou-se pelo uso do material seco para a produção do concreto.

Os valores encontrados foram descontados no cálculo da quantidade de água a ser adicionada durante a mistura do concreto.

O processo de pesagem dos recipientes e materiais antes e após a secagem em estufa se encontram na Figura 48.

Figura 48 - Processo de obtenção da umidade dos resíduos. A) Pesagem do recipiente. B) Pesagem do resíduo de policarbonato úmido. C) Pesagem do resíduo de policarbonato seco. D) Pesagem do recipiente. E) Pesagem do resíduo de resina úmido. F) Pesagem do resíduo de resina seco.



Fonte: Autor

5.1.4. Determinação da massa unitária

O ensaio e o seu cálculo foram realizados conforme procedimentos descritos no item 4.2.1. A pesagem das amostras se encontra ilustrada na Figura 49. Os resultados se encontram na Tabela 40 e na Tabela 41. Vale salientar que foi realizada a secagem do policarbonato em estufa, de acordo com o aludido no item anterior, antes da aferição de sua massa unitária.

Tabela 40 - Massa unitária das amostras de policarbonato

| | | |
|---------------------------------------|--------|--------|
| m_{rr} (kg) | 1,400 | 1,398 |
| m_r (kg) | 0,395 | 0,395 |
| V (m ³) | 0,012 | 0,012 |
| ρ_r (kg/m ³) | 83,510 | 83,340 |
| ρ_r média (kg/m ³) = | | 83,420 |

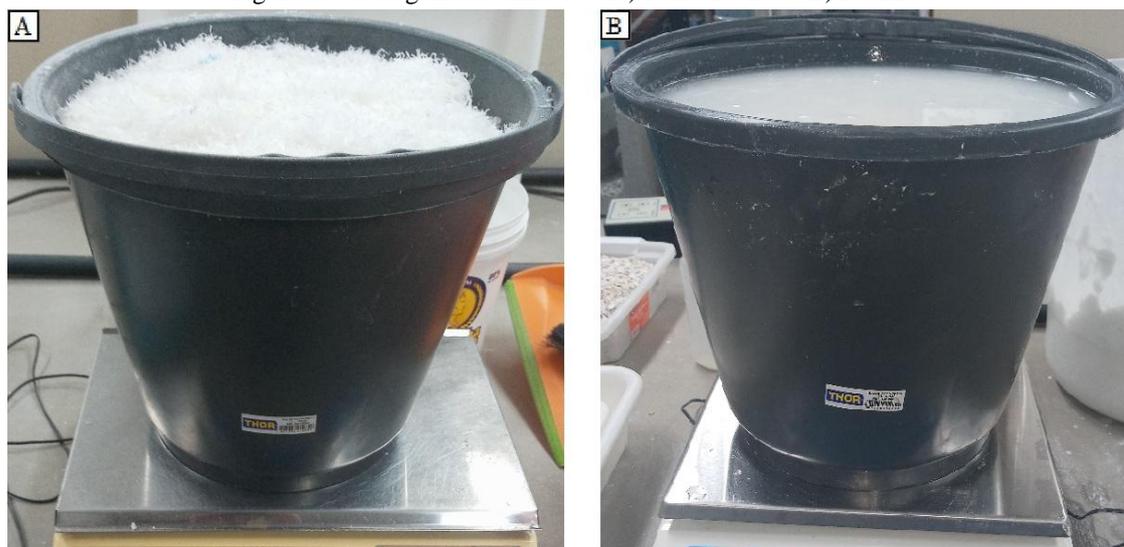
Fonte: Autor

Tabela 41 - Massa unitária das amostras de resina

| | | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| m_{rr} (kg) | 13,435 | 13,305 |
| m_r (kg) | 0,400 | 0,400 |
| V (m ³) | 0,012 | 0,012 |
| ρ_r (kg/m ³) | 1.083,110 | 1.072,310 |
| ρ_r média (kg/m ³) = | | 1.077,710 |

Fonte: Autor

Figura 49 - Pesagem das amostras. A) Policarbonato. B) Resina



Fonte: Autor

Os valores encontrados para a massa unitária dos resíduos foram utilizados para a aferição das quantidades a serem inseridas no concreto, durante a sua mistura, de modo a se converter o volume de areia a ser substituído em massa dos materiais empregados. Entretanto, observou-se que a massa unitária de ambos é inferior a do agregado miúdo.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO CONCRETO

Nos itens a seguir são apresentados os resultados e análises dos parâmetros necessários à realização do estudo de dosagem, indicados e descritos no item 4.2.2, para o cimento e

agregados miúdo e graúdo.

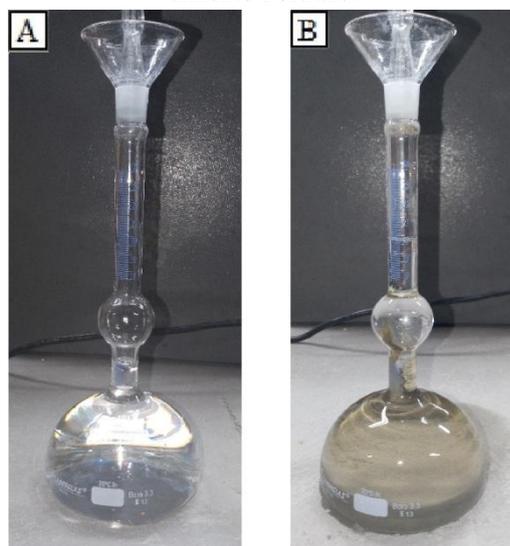
5.2.1. Cimento Portland

A determinação de sua massa específica e massa unitária foram necessárias para a determinação do traço do concreto e para a estimativa da quantidade de material a ser usada.

5.2.1.1. Massa específica

Tendo sido realizado o procedimento descrito em 4.2.2.1, os cálculos foram efetuados mediante Equação (29). As leituras no frasco de Le Chatelier constam na Figura 50.

Figura 50 – Aferição da massa específica do cimento Portland. A) Frasco com xileno. B) Frasco com xileno e cimento Portland.



Fonte: Autor

Desse modo, foi obtido um valor médio de $3,08 \text{ g/cm}^3$. Os resultados obtidos nos ensaios se encontram no Apêndice A. A massa específica obtida apresentou um valor próximo ao fornecido pelo fabricante de $3,02 \text{ g/cm}^3$, conforme descrito no Anexo A. Além disso, o resultado do ensaio situa-se dentro dos parâmetros da ficha de informação de segurança de produtos químicos (FISPQ) publicada pela ABCP (2016), que estabelece como limites os valores de $2,8$ a $3,2 \text{ g/cm}^3$.

5.2.1.2. Massa unitária

O ensaio for realizado conforme procedimentos especificados no item 4.2.2.1, com o cálculo efetuado conforme Equação (30). Os valores obtidos se encontram na Tabela 42,

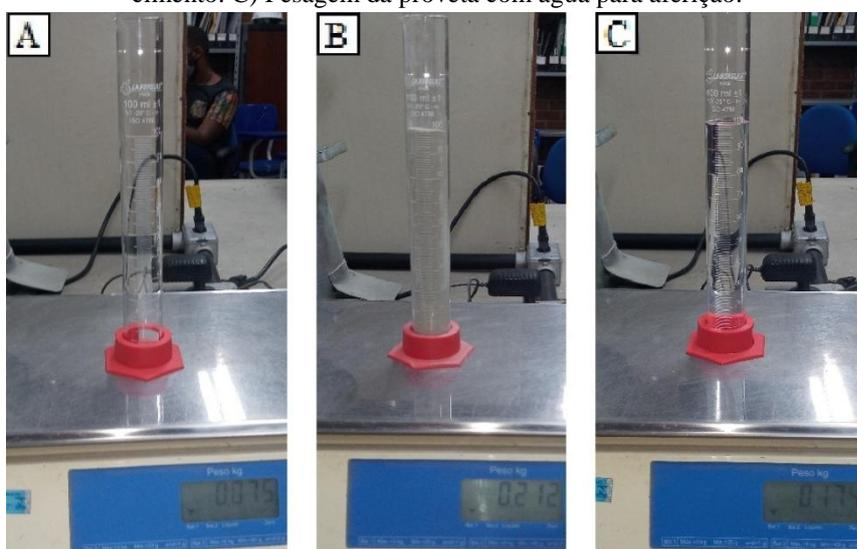
enquanto as pesagens constam na Figura 51.

Tabela 42 - Massa unitária do cimento

| | |
|-------------------------------|----------|
| m_{fc} (kg) | 0,212 |
| m_f (kg) | 0,075 |
| m_{fa} (m ³) | 0,174 |
| ρ_c (kg/m ³) | 1.383,84 |

Fonte: Autor

Figura 51 - Ensaio de massa unitária. A) Pesagem da proveta vazia. B) Pesagem da proveta preenchida com cimento. C) Pesagem da proveta com água para aferição.



Fonte: Autor

O referido parâmetro foi empregado, junto com a massa unitária dos demais componentes na determinação das quantidades de material a serem inseridas na betoneira, para cada betonada.

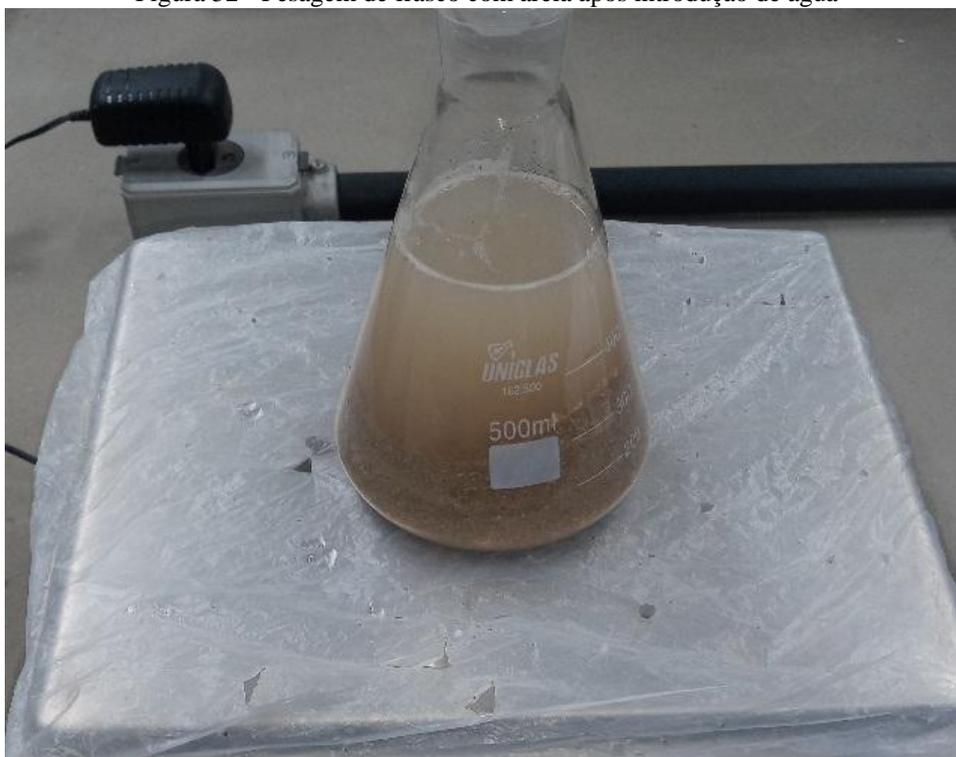
5.2.2. Agregado miúdo

A determinação da massa específica e da massa unitária é fundamental para o cálculo do traço do concreto, além da determinação do quantitativo de material a ser utilizado. O teor de umidade deve ser conhecido para especificação da quantidade de água a ser adicionada no traço padrão do concreto, devendo-se descontar o volume presente na areia. Por último, foi obtida a composição granulométrica, essencial para a realização do estudo de dosagem, onde foram calculados o módulo de finura e a dimensão máxima característica.

5.2.2.1. Massa específica

O ensaio foi realizado conforme procedimento especificado no item 4.2.2.2, com os cálculos efetuados segundo Equações (31), (32), (33) e (34), por meio das massas registradas durante o mesmo. A amostra foi previamente preparada conforme descrito no mesmo item supracitado. A Figura 52 mostra a pesagem do frasco com o agregado após a inserção de água até a marca de 500 ml.

Figura 52 - Pesagem de frasco com areia após introdução de água



Fonte: Autor

Os valores médios obtidos se encontram na Tabela 43, enquanto os resultados dos ensaios são apresentados no Apêndice A.

Tabela 43 - Valores médios das massas específicas obtidas para a areia

| | |
|---|------------------------|
| Massa específica do agregado seco (d_1) | 2,49 g/cm ³ |
| Massa específica do agregado saturado superfície seca (d_2) | 2,50 g/cm ³ |
| Massa específica do agregado (d_3) | 2,52 g/cm ³ |

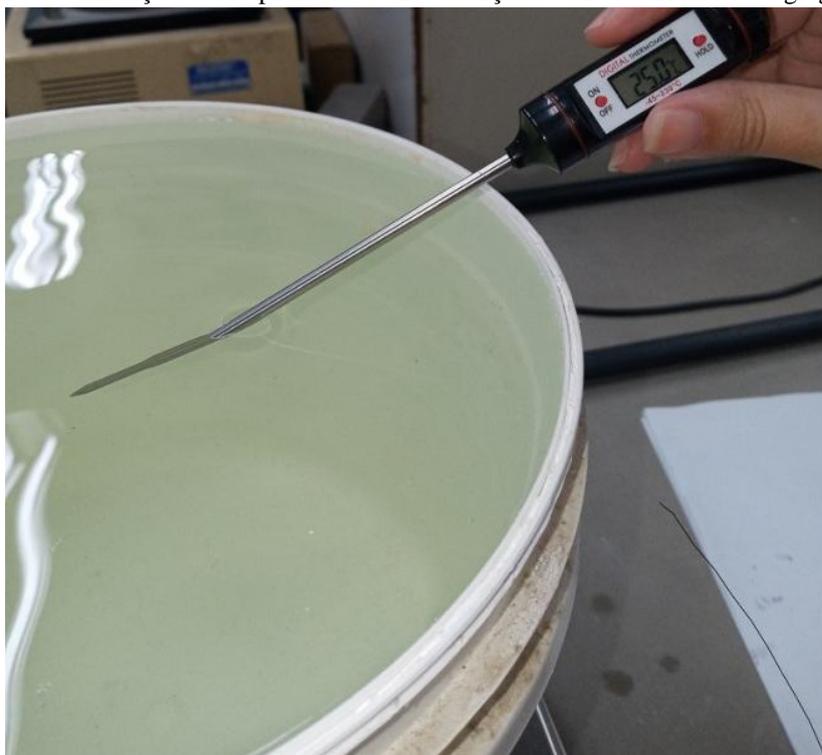
Fonte: Autor

De acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2011b), a areia ensaiada é considerada como agregado de densidade normal, compreendida entre 2 e 3 g/cm³.

5.2.2.2. Massa unitária

Foram realizados os procedimentos indicados em 4.2.2.2, sendo o volume do recipiente aferido a uma temperatura de 25°C, conforme Figura 53. A massa unitária foi calculada conforme Equação (35), através das massas registradas do agregado e do recipiente.

Figura 53 - Aferição do recipiente usado na obtenção da massa unitária dos agregados



Fonte: Autor

Sendo assim, a massa unitária calculada foi de, aproximadamente, 1.372,72 kg/m³ ou 1,37 g/cm³, sendo apresentados os resultados do ensaio no Apêndice A. O valor obtido se encontra fora dos limites mencionados por Mehta e Monteiro (1994) para agregados leves (≤ 1120 kg/m³) e pesado (≥ 2240 kg/m³). Dessa forma, corrobora-se a sua classificação como agregado de densidade normal, encontrada no item anterior, através de sua massa específica.

5.2.2.3. Teor de umidade

O ensaio foi executado conforme metodologia indicada no item 4.2.2.2, sendo o teor de umidade calculado conforme Equação (36), em função da leitura do volume, conforme Figura 54, e da massa específica na condição saturada superfície seca (d_2), obtida no item 5.2.2.1.

Figura 54 - Frasco de Chapman após ensaio



Fonte: Autor

O valor encontrado das amostras ensaiadas foi de, aproximadamente, 2,04%. Esse teor de umidade é importante, pois deve ser descontado do volume de água utilizado no traço, a partir da quantidade de areia seca. Os resultados dos ensaios se encontram no Apêndice A.

5.2.2.4. Granulometria

O ensaio foi realizado conforme procedimento descrito no item 4.2.2.2, respeitando-se as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Após a pesagem do material retido em cada peneira, foram determinadas as médias das amostragens que constam na Tabela 44.

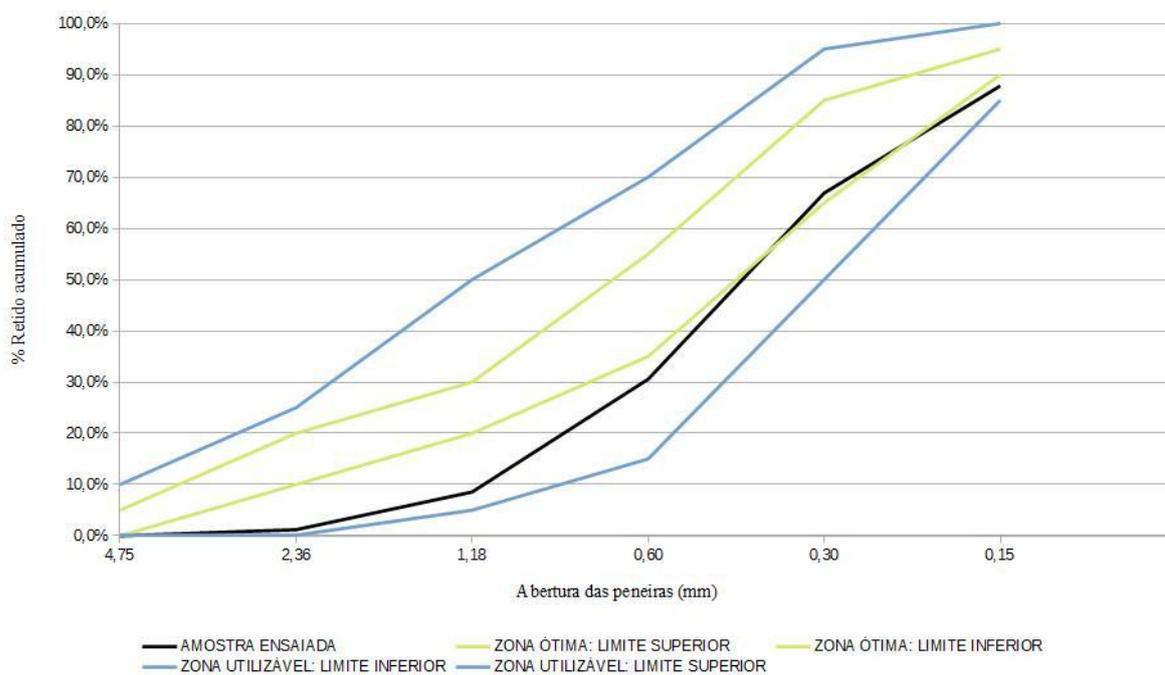
Tabela 44 - Composição granulométrica do agregado miúdo

| Abertura da malha | Massa retida (g) | % Retida | % Retida Acumulada |
|-------------------|------------------|----------|--------------------|
| 4,75 mm | 0,0 | 0,0% | 0,0% |
| 2,36 mm | 3,6 | 1,2% | 1,2% |
| 1,18 mm | 22,1 | 7,4% | 8,5% |
| 0,60 mm | 66,0 | 22,0% | 30,5% |
| 0,30 mm | 109,1 | 36,4% | 66,9% |
| 0,15 mm | 62,8 | 20,9% | 87,8% |
| 0,075 mm | 26,3 | 8,8% | 96,6% |
| Fundo | 10,2 | 3,4% | 100,0% |
| Total | 300,0 | | |

Fonte: Autor

No gráfico da Figura 55, observa-se que o agregado apresenta-se dentro da zona utilizável, conforme NBR 7211 (ABNT, 2009c), mencionada na Tabela 15. Além disso, o módulo de finura calculado foi de 1,95, também se encontrando dentro dos limites para a zona utilizável, conforme norma supracitada, disposto no item 3.2.2.

Figura 55 - Curva granulométrica da areia e dos limites estabelecidos em norma



Conforme percentuais retidos acumulados, observa-se que sua dimensão máxima característica é de 2,36 mm, pois a peneira com esta malha apresenta um percentual médio acumulado de 1,2%, abaixo dos 5% definidos pela referida norma para caracterizar tal parâmetro.

Considerando a dimensão máxima característica, Albuquerque (2006) classifica como areia média o agregado miúdo utilizado, conforme Tabela 13. De acordo com o módulo de finura, o agregado se encontra na faixa de classificação para areia fina, conforme classificação determinada pelo mesmo autor. Luz e Almeida (2012) também classificam em areia fina o referido agregado. As categorizações das areias em função do módulo de finura se encontram na Tabela 14.

5.2.3. Agregado graúdo

Primeiramente, foram realizados os ensaios de massa específica e massa unitária, necessários para a determinação do traço e consumo de materiais. Além disso, também foi determinada a sua umidade e absorção, necessários para quantificar o volume de água a ser inserido no concreto. Por último foram executados os ensaios de granulometria e obtenção de sua dimensão máxima característica, necessária para realização do estudo de dosagem.

5.2.3.1. Massa específica e absorção de água

Foi realizado o procedimento descrito no item 4.2.2.3, onde as massas específicas e absorção foram calculados pelas Equações (37), (38), (39) e (40). Foram registradas as massas da amostra na condição seca, saturada superfície seca e submersa, esta última ilustrada na Figura 56.

Figura 56 - Pesagem do agregado graúdo submerso



Fonte: Autor

Os valores médios calculados para as massas específicas e absorção do agregado graúdo se encontram na Tabela 45.

Tabela 45 - Valores das massas específicas obtidas para a brita

| | |
|---|------------------------|
| Massa específica do agregado seco (d) | 2,70 g/cm ³ |
| Massa específica do agregado saturado superfície seca (d _s) | 2,68 g/cm ³ |
| Massa específica aparente do agregado seco (d _a) | 2,67 g/cm ³ |
| Absorção de água (A) | 0,33% |

Fonte: Autor

De acordo com a classificação da NBR 9935 (ABNT, 2011b), citada no item 5.2.2.1, a brita empregada no concreto é considerada como agregado de densidade normal. Os resultados do ensaio se encontram no Apêndice A.

Devido à baixa absorção encontrada, a referida propriedade foi desconsiderada no cálculo da proporção de água para o traço.

5.2.3.2. Massa unitária

A determinação da massa unitária ocorreu pelo mesmo procedimento descrito no item 4.2.2.2, onde a norma de referência NBR NM 45 (ABNT, 2006a) é aplicável para todos os tipos de agregados. Dessa forma, o referido parâmetro foi calculado conforme Equação (35), através das massas registradas do agregado e do recipiente.

A massa unitária obtida foi de, aproximadamente, 1.483,29 kg/m³ ou 1,48 g/cm³, sendo apresentados os resultados do ensaio no Apêndice A. Do mesmo modo que o agregado miúdo, o valor calculado não se enquadra na classificação de Mehta e Monteiro (1994), citada no item 5.2.2.2, para ser considerado um agregado leve ou pesado. Desse modo, confirma-se sua classificação como agregado de densidade normal, conforme citado no item anterior.

5.2.3.3. Teor de umidade

O referido parâmetro foi determinado pelas massas registradas conforme metodologia indicada no item 4.2.2.3, calculado através da Equação (41). O valor obtido foi de, aproximadamente, 0,40%, estando os resultados no Apêndice A.

Devido à baixa umidade encontrada para a brita, a mesma foi desconsiderada no cálculo da água adicionada ao traço do concreto.

5.2.3.4. Granulometria

A composição granulométrica da brita ocorreu conforme procedimento descrito no

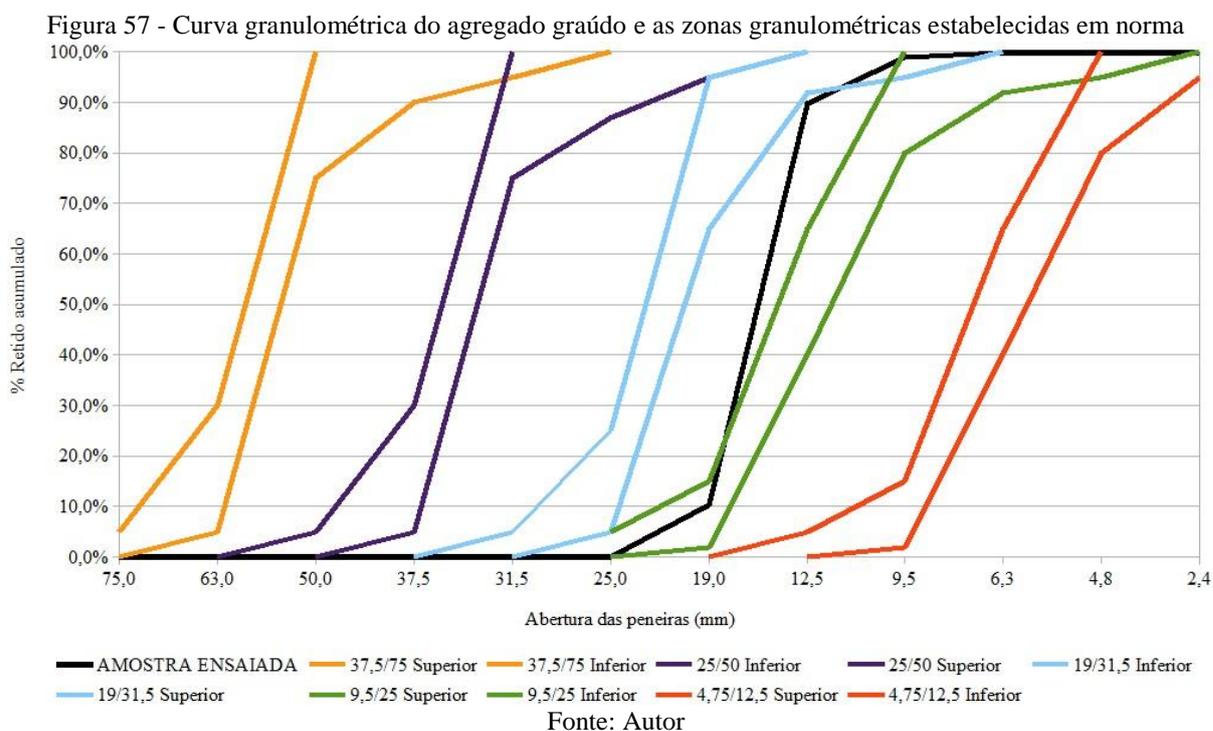
item 4.2.2.2, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). As pesagens dos materiais retidos nas peneiras foram realizadas em cada etapa, sendo os resultados somados no final, conforme apresentado na Tabela 46.

Tabela 46 - Composição granulométrica do agregado graúdo

| Abertura da malha | Massa retida (g) | % Retida | % Retida Acumulada |
|-------------------|------------------|----------|--------------------|
| 31,5 mm | 0 | 0% | 0% |
| 25,0 mm | 0 | 0% | 0% |
| 19,0 mm | 514 | 10,3% | 10,3% |
| 12,5 mm | 3969 | 79,4% | 89,7% |
| 9,5 mm | 459 | 9,2% | 98,8% |
| 6,3 mm | 49 | 1,0% | 99,8% |
| 4,75 mm | 0 | 0% | 99,8% |
| 2,36 mm | 0 | 0% | 99,8% |
| Fundo | 9 | 0,2% | 100,0% |
| Total | 5000 | | |

Fonte: Autor

O gráfico da granulometria do agregado graúdo é apresentado na Figura 57, onde se observa que o material se encontra nos limites entre as zonas granulométricas 9,5/25 e 19/31,5, conforme classificação da NBR 7211 (ABNT, 2009c), apresentada na Tabela 17.



Conforme percentuais retidos acumulados, a dimensão máxima característica da brita é 25 mm. Apesar da referida malha não ter retido material, a peneira de malha imediatamente inferior acumulou 10,3% do material ensaiado, superior aos 5% definidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009c) para classificação em tal diâmetro.

De acordo com Fusco (2008), o referido agregado é classificado como brita 3, conforme Tabela 16.

5.3. ESTUDO DE DOSAGEM E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

5.3.1. Determinação do consumo de água (C_a)

Com o abatimento estabelecido em 50 mm, conforme descrito no item 4.2.3, e a dimensão máxima característica do agregado graúdo em 25 mm, obteve-se o consumo de água aproximado de 190 l/m³ através da Tabela 22.

5.3.2. Determinação do consumo de cimento (C)

O consumo de cimento (C) calculado pela Equação (3), em função do consumo de água (C_a) e da relação água/cimento (a/c). Desse modo, foi obtido o valor aproximado de 431,82 kg/m³. Acrescenta-se que o resultado atende aos limites estabelecidos pela NBR 12.655 (ABNT, 2015b) para todas as classes de agressividade ambiental, conforme descrito na Tabela 18.

5.3.3. Determinação do consumo de agregado graúdo (C_b) e miúdo (C_m)

Para o agregado graúdo, foi determinado, primeiramente, seu volume compactado seco (V_c) através da Tabela 23, em função do módulo de finura da areia (MF), igual a 2, e da dimensão máxima característica da brita, de 25 mm, obtendo-se o valor de 0,775 m³/m³. Em seguida, o consumo da brita (C_b) foi calculado a partir de V_c e da sua massa unitária (ρ_{ap}), determinada em, aproximadamente, 1.483,29 kg/m³, através da Equação (4). Desse modo, o consumo do agregado graúdo (C_b) calculado foi de 1.149,55 kg/m³.

Conhecendo-se as massas específicas e consumos por metro cúbico do cimento, agregado graúdo e água, determinou-se o volume de agregado miúdo (V_m), através da Equação (5), em 0,24 m³/m³. Com a massa específica da areia (ρ_m) obtida de 2.523 kg/m³, por meio da Equação (6), o consumo de agregado miúdo (C_m) foi calculado em, aproximadamente, 614,80 kg/m³.

5.3.4. Definição do traço

Ao dividirem-se os consumos de todos os componentes pelo consumo de cimento, conforme Tabela 24, obteve-se o traço unitário do concreto padrão. O traço unitário e o traço por metro cúbico de concreto, ambos expressos em massa, estão apresentados na Tabela 47, a seguir.

Tabela 47 - Traço do concreto padrão, desconsiderando a umidade da areia.

| | Cimento (Kg) | Agregado Miúdo (Kg) | Agregado Graúdo (Kg) | Relação a/c |
|--------------------------|--------------|---------------------|----------------------|-------------|
| Traço unitário | 1 | 1,42 | 2,66 | 0,44 |
| Consumo / m ³ | 431,82 | 614,80 | 1149,55 | 190 |

Fonte: Autor

A partir do traço em massa por metro cúbico de concreto, foi calculado o volume real de cada componente, dividindo-os pelas suas respectivas massas específicas, estando os mesmos na Tabela 48. Vale salientar que a massa específica considerada para a água foi de 1000 kg/m³, enquanto as dos demais materiais foram descritas nos itens 5.2.1.1, 5.2.2.1 e 5.2.3.1.

Tabela 48 - Volume real dos componentes para 1 m³ de concreto

| Material | Volume real (m ³) |
|----------|-------------------------------|
| Cimento | 0,14 |
| Areia | 0,24 |
| Brita | 0,43 |
| Água | 0,19 |
| Total | 1,00 |

Fonte: Autor

Considerando que o corpo de prova cilíndrico possui diâmetro de 10 cm e altura 20 cm, calculou-se seu volume (V) conforme Equação (47).

$$V = \frac{\pi \times d^2}{4} \times h \quad (47)$$

Onde

d: diâmetro do corpo de prova (m);

h: altura do corpo de prova.

Sendo assim, o volume calculado do corpo de prova cilíndrico foi de, aproximadamente, 0,00157 m³.

Quanto aos corpos de prova prismáticos, esses foram moldados com 10 cm de largura, 35 cm de comprimento e 10 cm de altura. Seu volume é de 0,0035 m³.

Multiplicando-se o consumo em massa e volume por metro cúbico de concreto pelo volume do molde, obtêm-se as quantidades necessárias para produzir um corpo de prova, conforme Tabela 49.

Tabela 49 - Volume real e massa necessária para a moldagem de um corpo de prova

| Material | Molde Cilíndrico | | Molde Prismático | |
|----------|-------------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| | Volume real (m ³) | Massa (Kg) | Volume real (m ³) | Massa (Kg) |
| Cimento | 0,00022 | 0,68 | 0,00049 | 1,51 |
| Areia | 0,00038 | 0,96 | 0,00085 | 2,15 |
| Brita | 0,00067 | 1,81 | 0,00149 | 4,02 |
| Água | 0,00030 | 0,30 | 0,00067 | 0,67 |
| Total | 0,00157 | 3,75 | 0,00350 | 8,35 |

Fonte: Autor

Considerando o quantitativo de corpos de prova indicado na Tabela 37 mais a perda de material na moldagem, obteve-se um traço de referência de 20 kg de cimento para o traço padrão (T-0) e 16 kg para os demais. Para os moldes prismáticos, as proporções de material foram obtidas para 24 kg de cimento em todos os traços. Os mesmos estão indicados na Tabela 50. Vale salientar que as umidades da areia e do resíduo de resina (T_R) foram consideradas para o cálculo da água adicionada. A quantidade de resíduo foi determinada pelo seu percentual em relação ao volume unitário de areia seca, multiplicando-se o resultado pela sua massa unitária para a obtenção do valor adicionado ao concreto. Além disso, foi reduzido o quantitativo de areia referente ao mesmo volume acrescido de resíduo.

Tabela 50 - Traços para a produção dos corpos de prova

| Moldes | Traço | Teor de Resíduo | Quantidade dos componentes (Kg) | | | | |
|-------------|---------------------|-----------------|---------------------------------|-------|-------|---------|------|
| | | | Cimento | Areia | Brita | Resíduo | Água |
| Cilíndricos | T-0 | 0 | 20 | 29,05 | 53,24 | 0,00 | 8,22 |
| | T _P -2% | 2% | 16 | 22,78 | 42,59 | 0,03 | 6,58 |
| | T _P -6% | 6% | 16 | 21,85 | 42,59 | 0,08 | 6,58 |
| | T _P -10% | 10% | 16 | 20,92 | 42,59 | 0,14 | 6,58 |
| | T _R -2% | 2% | 16 | 22,78 | 42,59 | 0,36 | 6,37 |
| | T _R -6% | 6% | 16 | 21,85 | 42,59 | 1,07 | 5,98 |
| | T _R -10% | 10% | 16 | 20,92 | 42,59 | 1,79 | 5,58 |
| Prismáticos | T-0 | 0 | 24 | 34,87 | 63,89 | 0,00 | 9,86 |
| | T _P -2% | 2% | 24 | 34,17 | 63,89 | 0,04 | 9,86 |
| | T _P -6% | 6% | 24 | 32,77 | 63,89 | 0,12 | 9,86 |
| | T _P -10% | 10% | 24 | 31,38 | 63,89 | 0,21 | 9,86 |
| | T _R -2% | 2% | 24 | 34,17 | 63,89 | 0,54 | 9,56 |
| | T _R -6% | 6% | 24 | 32,77 | 63,89 | 1,61 | 8,97 |
| | T _R -10% | 10% | 24 | 31,38 | 63,89 | 2,68 | 8,37 |

Fonte: Autor

5.4. ANÁLISE DA TRABALHABILIDADE E ÁGUA ADICIONADA

O ensaio de abatimento foi realizado após a mistura de cada betonada, conforme procedimento descrito no item 4.2.8, respeitando-se os preceitos da NBR NM 67 (ABNT, 1998), ilustrado na Figura 58.

Figura 58 - Abatimento de tronco de cone



Fonte: Autor

Os corpos de prova eram moldados apenas quando o abatimento atingia o valor fixado de 50 ± 10 mm, adicionando-se água quando se apresentavam abaixo de tal condição.

Do traço padrão (T-0) até os traços T_P-6% e T_R-6%, observou-se uma redução na

trabalhabilidade do concreto, indicado pelo crescimento em 16% e 14%, da relação água/cimento (a/c), respectivamente. Entretanto, para os traços T_P-10% e T_R-10%, verificou-se um aumento na trabalhabilidade, ocasionando uma menor quantidade de água incrementada ao traço, mas ainda assim majorando a relação a/c quando em comparação ao traço de referência (T-0). Na Tabela 51 constam as relações água/cimento (a/c) médias de todas as betonadas de cada traço, obtidas após o acréscimo de água para correção do abatimento, seu desvio padrão, além dos valores máximos e mínimos dos abatimentos.

Tabela 51 - Relação água/cimento média para alcance do abatimento fixado

| Traço | Relação a/c Média | Desvio Padrão Relação a/c |
|---------------------|-------------------|---------------------------|
| T-0 | 0,43 | 0,02 |
| T _P -2% | 0,48 | 0,02 |
| T _P -6% | 0,50 | 0,01 |
| T _P -10% | 0,47 | 0,02 |
| T _R -2% | 0,47 | 0,04 |
| T _R -6% | 0,49 | 0,03 |
| T _R -10% | 0,48 | 0,01 |

Fonte: Autor

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a adição de fibras poliméricas ocasiona redução na trabalhabilidade do concreto proporcional ao seu teor em volume. Além disso, ressalta-se que, segundo Albuquerque (2008) o crescimento no teor de partículas lamelares e alongadas² ocasiona a perda de trabalhabilidade do concreto. Observa-se tal característica no resíduo de policarbonato.

Um estudo elaborado por Souza, Abreu e Morais (2015) observou o crescimento da consistência do concreto até o acréscimo de 100g do polímero CR-39[®], e queda quando adicionado em proporções superiores, porém com todos os resultados superiores ao do concreto padrão. Além disso, o estudo também verificou uma redução no abatimento ao acrescentar 100g de policarbonato, e seu crescimento no traço com adição de 500g, entretanto todos os valores apresentaram-se abaixo do concreto padrão. Além disso, a pesquisa também constatou que o concreto com adição de policarbonato e TRIVEX[®] não possui nenhuma trabalhabilidade, tendo apresentado um abatimento de valor zero.

² Segundo a norma BS 812-1 do British Standard Institution (BSI, 1975 apud NEVILLE, 2016), são classificadas como lamelares e alongadas as partículas com o “comprimento bem maior do que a largura e largura bem maior do que a espessura”.

Na pesquisa realizada por Leite (2018), com o uso de macrofibra polimérica, o mesmo cita que a maioria dos concretos apresentou perda no abatimento com o aumento no teor da fibra. Entretanto, verificou-se, em algumas betonadas, o acréscimo seguido da perda do abatimento para teores de 0,5% e 1,0% em volume, respectivamente. Porém, a análise apresenta que, no concreto com adição de fibras, foi inserida uma proporção superior de aditivo, em relação aos concretos de referência.

Oliveira (2018) analisou o comportamento do concreto com microfibras e macrofibras poliméricas, encontrando oscilações na trabalhabilidade conforme variação na concentração de fibras, para uma mesma proporção de superplastificante.

Além disso, Neville (2016) afirma que a redução da relação agregado/cimento resulta no aumento da trabalhabilidade, para uma proporção água/cimento constante, devido ao aumento do teor de água em relação à superfície de sólidos. Além disso, o autor também cita que a elevação da relação, em volume, entre agregado graúdo e miúdo pode ocasionar a redução da trabalhabilidade. Entretanto, o mesmo menciona que bastante material fino provoca uma maior consistência, apesar de produzir concretos menos duráveis.

As relações água/cimento, em todos os traços, se encontraram abaixo do limite máximo compatível com a classe de agressividade ambiental III, referente ao concreto armado, conforme estabelecido pela NBR 12.655 (ABNT, 2015b) e NBR 6118 (ABNT, 2014), e indicado na Tabela 18. Na Figura 59 e na Figura 60 se encontram os valores máximo, mínimo e médio da relação água/cimento e os limites das normas citadas para as classes III e IV de agressividade ambiental.

Figura 59 - Gráfico dos valores da relação água/cimento em função do teor de resíduo de policarbonato

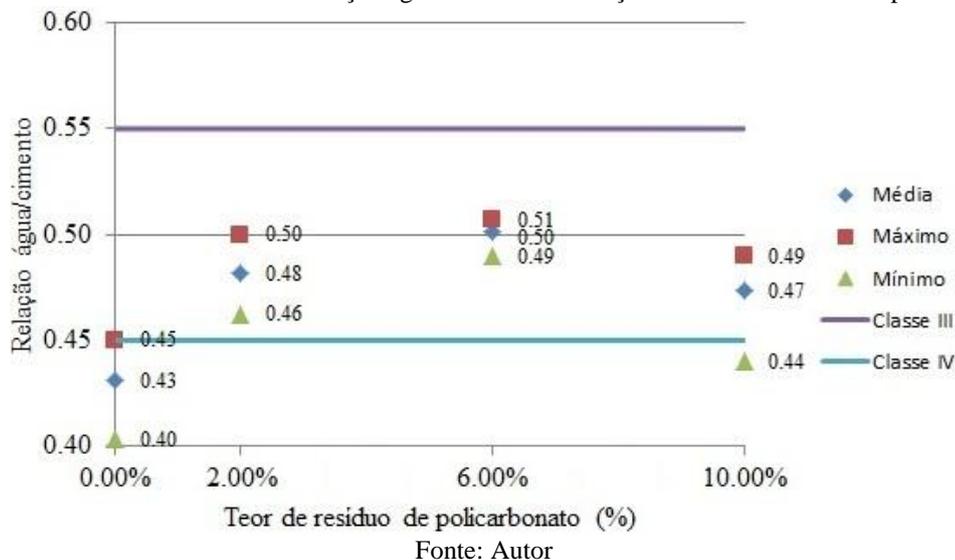
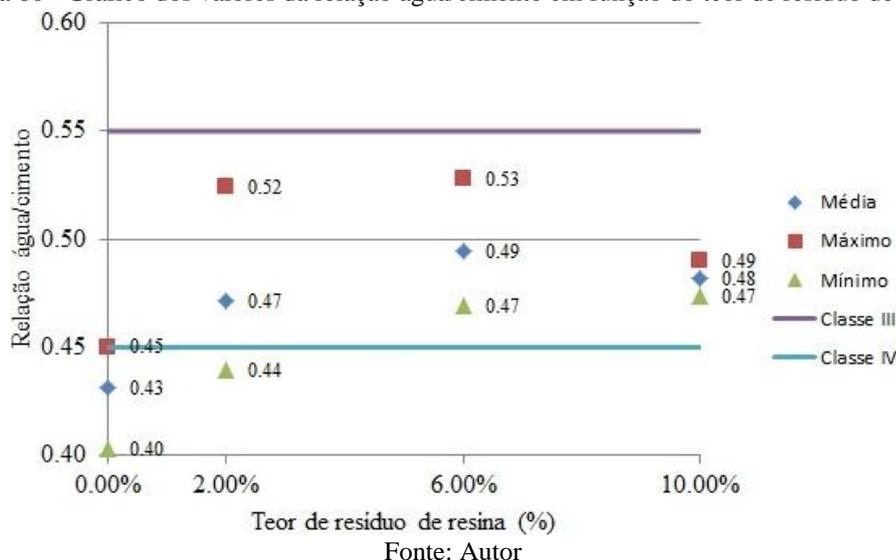


Figura 60 - Gráfico dos valores da relação água/cimento em função do teor de resíduo de resina



Considerando as classes de consistência da NBR 8953 (ABNT, 2015a), apresentada na Tabela 28, os traços T_P-2%, T_P-6% e T_R-2% apresentaram os abatimentos de todas as betonadas compatíveis com a classe S10. Os demais traços apresentaram resultados que variam entre as classes S10 e S50. Entretanto, todas as betonadas apresentaram consistência compatível com o valor adotado na dosagem apenas após a adição de água. Tal entendimento se traduz pelo fato de todos os traços com adição de resíduos apresentaram relação água/cimento superior ao do concreto padrão.

5.5. ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O preparo dos corpos de prova e seus rompimentos foram realizados conforme procedimentos indicados no item 4.2.10. As resistências características à compressão ($f_{ck,est}$) foram calculadas por meio das Equações (19) e (20), para o traço T-0, e a Equação (18) para os demais traços, conforme especificado pela NBR 12.655 (ABNT, 2015b). Os resultados de todos os ensaios se encontram nos Apêndices B, C, D, E, F, G e H. Além disso, foram determinados os parâmetros estatísticos de média e desvio padrão. Na Tabela 52 se encontram os valores calculados para todos os traços.

Tabela 52 - Parâmetros estatísticos dos traços para a resistência à compressão

| Traço | Resistência Mínima (MPa) | Resistência Máxima (MPa) | Resistência Média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | $f_{ck,est}$ (MPa) |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| T-0 | 31,22 | 38,86 | 34,57 | 2,48 | 30,48 |
| T _P -2% | 33,82 | 37,82 | 36,48 | 1,16 | 34,30 |
| T _P -6% | 31,57 | 35,62 | 33,84 | 1,30 | 31,69 |
| T _P -10% | 35,14 | 39,57 | 37,13 | 1,50 | 35,19 |
| T _R -2% | 34,19 | 38,92 | 36,33 | 1,57 | 33,52 |
| T _R -6% | 30,97 | 35,48 | 33,43 | 1,34 | 31,20 |
| T _R -10% | 28,68 | 30,52 | 29,57 | 0,66 | 28,19 |

Fonte: Autor

Ao analisar a resistência característica para o resíduo de policarbonato, observou-se o seu crescimento, com os maiores aumentos registrados nos traços T_P-2% e T_P-10%, superando em 12,5% e 15,5% a resistência do concreto padrão, respectivamente. Para o resíduo de resina, o maior crescimento foi registrado no traço T_R-2%, com 10%, seguido do acréscimo de 2,4% para T_R-6%. Entretanto, para T_R-10%, houve uma queda de 7,5% do valor da resistência. Acrescenta-se que os desvios padrões calculados para os traços com resíduo demonstraram uma menor dispersão dos resultados comparados ao valor encontrado para o concreto padrão.

Souza, Abreu e Morais (2015) encontraram resistências à compressão inferiores à do concreto padrão quando adicionado resíduo de CR-39[®], nas quantidades de 100g, 500g e 1000g, tendo esta penúltima apresentada a menor resistência. Vale salientar que as quantidades do resíduo supracitado equivalem a, aproximadamente, 6,94, 34,72 e 69,44 gramas de resíduo por litro de areia, respectivamente. Quanto ao resíduo de policarbonato, o estudo observou um crescimento para o teor de 100g, e uma queda para quantidades superiores. A quantidade de policarbonato inserida equivale ao mesmo teor por volume de

areia citado anteriormente. No entanto todos os valores de resistência apresentaram-se superiores ao do traço padrão.

Com a finalidade de determinar a relevância das divergências entre as médias, optou-se pela realização do teste de Tukey a um nível de significância de 5%. Os resultados se encontram na Tabela 53 e na Tabela 54 para os traços com policarbonato e resina, respectivamente, estando o concreto padrão em ambas. Os resultados que apresentaram semelhança estatística estão representados pelas variáveis a1, a2 ou a3, indicadas na mesma coluna.

Tabela 53 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos com resíduo de policarbonato

| Traços | Médias | Resultados | | |
|---------------------|-----------|------------|----|----|
| T _P -6% | 33.842000 | a1 | - | - |
| T-0 | 34.565500 | a1 | a2 | - |
| T _P -2% | 36.477000 | - | a2 | a3 |
| T _P -10% | 37.131000 | - | - | a3 |

Fonte: Autor

Tabela 54 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos com resíduo de resina

| Traços | Médias | Resultados | | |
|---------------------|-----------|------------|----|----|
| T _R -10% | 29.566000 | a1 | - | - |
| T _R -6% | 33.431000 | - | a2 | - |
| T-0 | 34.565500 | - | a2 | a3 |
| T _R -2% | 36.330000 | - | - | a3 |

Fonte: Autor

Observou-se que, no concreto com resíduo de policarbonato, não houve diferença significativa do traço padrão para T_P-2% e T_P-6%. Entretanto, o traço T_P-10% se mostrou próximo de T_P-2%, divergindo estatisticamente dos demais.

Referente aos traços com resíduo de resina, a média de T_P-10% apresentou-se distante dos demais concretos. Além disso, os traços T_P-2% e T_P-6% mostraram-se estatisticamente próximos ao T-0.

De modo geral, as divergências estatísticas decorrentes do teste de Tukey, em relação a T-0, ocorreram a partir dos traços T_P-10% e T_R-10%.

Schettino (2015) realizou um estudo em concretos com fibras de PET nos teores de 5%, 10% e 15%. Foi relatado um declínio abrupto da resistência à compressão entre o concreto sem fibras e o traço com teor de 5%, bem como nos traços com teores de 10% e 15%. Entre os traços com 5% e 10%, o autor citou que os resultados apresentaram um patamar estável. Além disso, o mesmo complementou que não houve grande dispersão para os

resultados aferidos.

Leite (2018) encontrou um crescimento na resistência de concretos convencionais com adição de macrofibra polimérica nos teores de 0,5% e 1%, com os aumentos mais significativos para os menores teores. Em concretos de alta resistência, o autor observou um pequeno aumento na resistência (4,7%) para o teor de 1%, seguido de uma queda abrupta (7,2%) para o teor de 2%. O mesmo afirma que, seu teor exerceu uma influência significativa na variação dos resultados na resistência à compressão de ambos os tipos de concreto, havendo influência do tipo de fibra apenas para o concreto de alta resistência.

Com exceção do traço $T_R-10\%$, todas as resistências características à compressão ($f_{ck,est}$) atingiram o limite mínimo recomendado pelo manual de pavimentos rígidos do DNIT (BRASIL, 2005), estabelecido em 30MPa, para a aplicação designada no título da referida publicação. O mesmo limite é recomendado para sua aplicação em pisos industriais, segundo recomendação da Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPRE, 2018), onde o referido concreto apresentou o desempenho supracitado. Ainda acrescenta-se que os referidos traços se mostraram compatíveis com ambientes de classe III, conforme estabelecido pela NBR 12.655 (ABNT, 2015b) e NBR 6118 (ABNT, 2014), para estruturas de concreto armado, que estabelece a mesma resistência supracitada como requisito mínimo.

5.6. ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Tendo o ensaio sido realizado conforme descrito no item 4.2.11, o cálculo da resistência característica à tração ($f_{tm,est}$) conforme Equação (26), seguindo as determinações normativas do DNIT (BRASIL, 2004a, 2004b, 2004c). Os resultados de todos os ensaios constam nos Apêndices I, J, K, L, M, N e O. Na Tabela 55 constam as resistências máxima, mínima, média e característica, além do desvio padrão para todos os traços.

Tabela 55 - Parâmetros estatísticos dos traços para a resistência à tração na flexão

| Traço | Resistência Mínima (MPa) | Resistência Máxima (MPa) | Resistência Média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | $f_{ctm,est}$ (MPa) |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| T-0 | 4,55 | 5,52 | 4,81 | 0,28 | 4,56 |
| T _P -2% | 4,34 | 5,52 | 4,65 | 0,35 | 4,34 |
| T _P -6% | 5,00 | 5,65 | 5,28 | 0,21 | 5,10 |
| T _P -10% | 4,31 | 6,62 | 5,23 | 0,70 | 4,60 |
| T _R -2% | 4,75 | 5,68 | 5,07 | 0,30 | 4,80 |
| T _R -6% | 4,18 | 4,98 | 4,51 | 0,29 | 4,25 |
| T _R -10% | 4,24 | 5,03 | 4,59 | 0,29 | 4,34 |

Fonte: Autor

Para o resíduo de policarbonato, houve uma queda na resistência característica no traço T_P-2%, seguida de crescimento nos traços posteriores, tendo o T_P-6% a maior proporção com, aproximadamente, 11,8%. Em relação ao resíduo de resina, observou-se um aumento aproximado de 5,3% para o traço T_R-2%, seguido de queda na resistência característica à tração para os traços subsequentes, tendo seu maior índice em T_R-6%, de 6,8%. Não houve mudança significativa na dispersão do concreto ocasionada pela adição dos resíduos, com exceção ao traço T_P-10%, que apresentou desvio padrão superior aos demais.

Uma pesquisa realizada por Pelegrin *et al.* (2018), em concretos com fibras recicladas de polipropileno, mostrou um crescimento seguido de queda na resistência à tração na flexão, para os teores de fibra de 0,9 e 1,8 kg/m³ de concreto.

Santiago *et al.* (2021) também analisaram concretos com adição de fibras de polipropileno recicladas. O estudo relatou ganho de resistência à tração na flexão de 10,42% para traços com fibra no teor de 0,9 kg/m³ em relação ao concreto de referência, e reduções de 2,08% e 35,42%, para concretos com teores de 1,8 e 2,7 kg/m³ de fibra.

O estudo realizado por Fonseca Júnior (2019) com adição de EPS em concreto, nos teores de 5%, 10% e 15% em massa substituída de areia, evidenciou um aumento na sua resistência à tração para a menor proporção de resíduo, seguida de queda progressiva nos teores subsequentes. Para a incorporação de resíduos de PET, nos mesmos teores acima citados, o autor observou aumento de resistência à tração para todos os traços, com maiores ganhos nos traços com 5% e 15%. Estatisticamente, o mesmo verificou que não havia diferença significativa entre o traço de referência e com teor de 5% de EPS, enquanto os traços subsequentes apresentaram divergência. Para o resíduo de PET, relatou-se não haver discrepâncias relevantes entre os traços.

Para as resistências médias à tração, também foi realizado o teste de Tukey, a um nível

de significância de 5%, com a finalidade de observar a relevância da variação entre os traços com diferentes teores de resíduo. Os resultados estão descritos na Tabela 56 e na Tabela 57 para os resíduos de policarbonato e resina, respectivamente.

Tabela 56 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à tração na flexão dos concretos com resíduo de policarbonato

| Traços | Médias | Resultados | |
|---------------------|----------|------------|----|
| T _P -2% | 4.650000 | a1 | - |
| T-0 | 4.814000 | a1 | a2 |
| T _P -10% | 5.225000 | - | a2 |
| T _P -6% | 5.279000 | - | a2 |

Fonte: Autor

Tabela 57 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à tração na flexão dos concretos com resíduo de resina

| Traços | Médias | Resultados | |
|---------------------|----------|------------|----|
| T _R -6% | 4.508000 | a1 | - |
| T _R -10% | 4.590000 | a1 | - |
| T-0 | 4.814000 | a1 | a2 |
| T _R -2% | 5.067000 | - | a2 |

Fonte: Autor

Em comparação com o traço padrão, não foram observadas divergências estatísticas em relação aos concretos com adição de ambos os resíduos. Desse modo, verifica-se que o resíduo não influenciou significativamente na resistência à tração na flexão do concreto para os teores estudados.

Os valores encontrados nos ensaios correspondem aos limites mínimos para uso em pavimento permeáveis de concreto, conforme NBR 16.416 (ABNT, 2015c). A referida norma estabelece a resistência mínima de 1,0 MPa para pavimentos sujeitos apenas a tráfego e pedestres e 2,0 MPa para tráfego leve. As resistências características à tração também se encontram dentro do intervalo típico para uso em pavimentos de concreto simples, mencionado por Pitta (1998), que se encontra entre 3,8 MPa e 5,0 MPa. Entretanto, os traços T_P-2%, T_R-6% e T_R-10% apresentaram resultados abaixo do valor recomendado pelo Manual de pavimentos rígidos do DNIT (BRASIL, 2005), fixado em 4,50 MPa. Quanto a sua aplicação em pisos industriais, os concretos analisados atingiram o limite recomendado pela ANAPRE (2018), estabelecido em 4,20 MPa.

5.7. ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Os ensaios foram realizados em quatro corpos de prova cilíndricos após 28 dias de cura, conforme procedimento descrito no item 4.2.7, respeitando as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2009d). Os indicadores foram calculados conforme Equações (42), (43), (44), (45) e (46). Na Tabela 58 se encontram os resultados máximo, mínimo e médio, bem como o desvio padrão, para todos os parâmetros.

Tabela 58 - Valores encontrados para a absorção de água, índice de vazios e massas específicas

(Continua)

| Traço | Valores | Absorção de água (%) | Índice de vazios (%) | ρ_s (g/cm ³) | ρ_{sat} (g/cm ³) | ρ_r (g/cm ³) |
|---------------------|---------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| T-0 | Máximo | 3,94 | 9,24 | 2,3683 | 2,4587 | 2,6038 |
| | Mínimo | 3,67 | 8,46 | 2,3064 | 2,3910 | 2,5196 |
| | Média | 3,78 | 8,82 | 2,3349 | 2,4231 | 2,5609 |
| | Desvio padrão | 0,13 | 0,38 | 0,0269 | 0,0301 | 0,0387 |
| T _P -2% | Máximo | 4,49 | 10,19 | 2,3067 | 2,3930 | 2,5282 |
| | Mínimo | 3,74 | 8,63 | 2,2675 | 2,3694 | 2,5245 |
| | Média | 4,26 | 9,71 | 2,2803 | 2,3774 | 2,5256 |
| | Desvio padrão | 0,35 | 0,73 | 0,0179 | 0,0106 | 0,0017 |
| T _P -6% | Máximo | 5,05 | 11,46 | 2,2812 | 2,3866 | 2,5647 |
| | Mínimo | 4,62 | 10,54 | 2,2707 | 2,3806 | 2,5500 |
| | Média | 4,82 | 10,95 | 2,2742 | 2,3837 | 2,5539 |
| | Desvio padrão | 0,18 | 0,39 | 0,0049 | 0,0028 | 0,0073 |
| T _P -10% | Máximo | 3,95 | 9,06 | 2,3089 | 2,3917 | 2,5267 |
| | Mínimo | 3,59 | 8,28 | 2,2871 | 2,3774 | 2,5142 |
| | Média | 3,86 | 8,05 | 2,2960 | 2,3845 | 2,5190 |
| | Desvio padrão | 0,18 | 0,38 | 0,0097 | 0,0066 | 0,0054 |
| T _R -2% | Máximo | 4,36 | 9,97 | 2,2862 | 2,3859 | 2,5393 |
| | Mínimo | 3,92 | 8,95 | 2,2437 | 2,3354 | 2,4704 |
| | Média | 4,13 | 9,39 | 2,2714 | 2,3653 | 2,5068 |
| | Desvio padrão | 0,18 | 0,44 | 0,0196 | 0,0215 | 0,0282 |

Tabela 58 - Valores encontrados para a absorção de água, índice de vazios e massas específicas

(Conclusão)

| Traço | Valores | Absorção de água (%) | Índice de vazios (%) | ρ_s (g/cm ³) | ρ_{sat} (g/cm ³) | ρ_r (g/cm ³) |
|---------------------|---------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| T _R -6% | Máximo | 4,08 | 9,27 | 2,2780 | 2,3674 | 2,5035 |
| | Mínimo | 3,93 | 8,95 | 2,2675 | 2,3592 | 2,4947 |
| | Média | 4,02 | 9,13 | 2,2714 | 2,3627 | 2,4995 |
| | Desvio padrão | 0,07 | 0,15 | 0,0047 | 0,0039 | 0,0039 |
| T _R -10% | Máximo | 4,30 | 9,74 | 2,2875 | 2,3610 | 2,5072 |
| | Mínimo | 3,21 | 7,35 | 2,2630 | 2,3546 | 2,4690 |
| | Média | 3,83 | 8,69 | 2,2717 | 2,3585 | 2,4879 |
| | Desvio padrão | 0,46 | 1,00 | 0,0109 | 0,0029 | 0,0162 |

Fonte: Autor

Quanto à absorção de água e o índice de vazios, observou-se seu crescimento até um valor máximo, seguido de queda. O valor máximo ocorreu no teor de 6% para os traços T_P e 2% em T_R. Realizando-se o teste de Tukey, com significância de 5%, observou-se que o traço T_P-6% diverge estatisticamente dos demais, conforme Tabela 59 tanto para a absorção de água, quanto para o índice de vazios. Quanto aos concretos com resíduo de resina, o referido teste não encontrou diferenças estatisticamente relevantes entre os traços, para a absorção de água e índice de vazios, conforme indicado na Tabela 60.

Tabela 59 - Resultados do teste de Tukey para a absorção de água e índice de vazios dos concretos com resíduo de policarbonato

| Parâmetros | Traços | Médias | Resultados | | |
|----------------------|---------------------|-----------|------------|----|----|
| Absorção de água (%) | T-0 | 3.777500 | a1 | - | - |
| | T _P -10% | 3.855000 | a1 | a2 | - |
| | T _P -2% | 4.260000 | - | a2 | - |
| | T _P -6% | 4.815000 | - | - | a3 |
| Índice de vazios (%) | T-0 | 8.817500 | a1 | - | - |
| | T _P -10% | 8.850000 | a1 | - | - |
| | T _P -2% | 9.712500 | a1 | - | - |
| | T _P -6% | 10.950000 | - | a2 | - |

Fonte: Autor

Tabela 60 - Resultados do teste de Tukey para a absorção de água e índice de vazios dos concretos com resíduo de resina

| Parâmetros | Traços | Médias | Resultados |
|----------------------|---------------------|----------|------------|
| Absorção de água (%) | T-0 | 3.777500 | a1 |
| | T _R -10% | 3.822500 | a1 |
| | T _R -6% | 4.017500 | a1 |
| | T _R -2% | 4.135000 | a1 |
| Índice de vazios (%) | T _R -10% | 8.687500 | a1 |
| | T-0 | 8.817500 | a1 |
| | T _R -6% | 9.130000 | a1 |
| | T _R -2% | 9.390000 | a1 |

Fonte: Autor

Além disso, acrescenta-se que partículas com forma lamelar, como ocorre no resíduo de policarbonato, tendem a se orientar em um plano, facilitando o acúmulo de água de exsudação e formação de vazios sobre as mesmas (NEVILLE, 2016). Mehta e Monteiro (1994) ainda citam que tal fenômeno ocasiona danos à zona de transição entre a partícula e a pasta de cimento. Vale salientar que, por se tratarem de resíduos, foram encontradas impurezas oriundas do processamento das lentes em todas as suas etapas, tanto materiais sólidos quanto líquidos, podendo influenciar o acúmulo de água de exsudação, contribuindo para a formação de vazios.

Um estudo realizado por Almeida (2017), com polímeros oriundos de resíduos eletroeletrônicos, encontrou valores máximos de absorção de água e índice de vazios nos traços com teor de 5%, para corpos de prova aos 28 dias de cura. Também foram produzidos traços nos teores de 8%, 10%, 15% e 20%. O autor cita que os resultados de absorção encontrados se encontram dentro da margem de erro, não havendo alterações significativas.

Santos e Ferrari (2019) pesquisaram a adição de resíduos de PVC em concretos para peças de pavimento intertravado, substituindo-se a areia média nos teores de 5%, 10% e 15% em volume. Apesar de ser observado crescimento da absorção de água e índice de vazios para os teores de 5% e 15%, os autores citaram que, estatisticamente, não houve influência da adição dos resíduos no resultados.

Schilive *et al.* (2021) analisaram a adição de resíduo de PET em concreto nos mesmos teores do estudo citado anteriormente. Os mesmos registraram aumento na absorção de água e índice de vazios para os teores de 5% e 15%, e queda para o traço com 10%. Entretanto, os autores citaram que os traços com teor de 5% e 10% pouco diferiram do concreto de referência.

Vale salientar que os valores encontrados para absorção de água se encontram dentro

dos limites exigidos pela NBR 15.396 (ABNT, 2018b) para aplicação em galerias celulares pré-moldadas de concreto armado. A referida norma estabelece o limite de 8% para utilização geral e 6% para aplicação em redes de esgoto sanitário e efluentes industriais.

Quanto às massas específicas, foi observado um decréscimo no seu valor até um ponto mínimo, ocorrido em T_P-6% para a massa específica seca (ρ_s) e em TP-2% para a massa específica saturada (ρ_{sat}), para os traços com resíduo de policarbonato. Para a massa específica real (ρ_r) observou-se uma oscilação nos resultados, com uma redução em T_P-2%, seguida de crescimento no traço seguinte, com outra diminuição em T_P-10%. O teste de Tukey constatou a ausência de variação relevante entre os valores médios encontrados para os traços T_P, ocorrendo apenas um decréscimo em relação a o traço padrão, para todas as massas específicas, conforme verificado na Tabela 61. Referente aos concretos com resíduo de resina, verificou-se um declínio em ρ_{sat} e ρ_r em função do aumento do teor de resíduo. Entretanto, para ρ_s , observou-se uma diminuição para o traço T_R-2%, permanecendo constante para os percentuais superiores. Realizando-se o teste de Tukey, também foi demonstrado que os traços com diferentes teores de resíduo de resina são, estatisticamente iguais, diferindo apenas do traço padrão, conforme verificado na Tabela 62.

Tabela 61 - Resultados do teste de Tukey para as massas específicas dos concretos com resíduo de policarbonato

| Parâmetros | Traços | Médias | Resultados | |
|--------------|---------------------|----------|------------|----|
| ρ_s | T _P -6% | 2.274176 | a1 | - |
| | T _P -2% | 2.280284 | a1 | - |
| | T _P -10% | 2.296018 | a1 | - |
| | T-0 | 2.334946 | - | a2 |
| ρ_{sat} | T _P -2% | 2.377404 | a1 | - |
| | T _P -6% | 2.383686 | a1 | - |
| | T _P -10% | 2.384533 | a1 | - |
| | T-0 | 2.423145 | - | a2 |
| ρ_r | T _P -10% | 2.518992 | a1 | - |
| | T _P -2% | 2.525572 | a1 | a2 |
| | T _P -6% | 2.553868 | a1 | a2 |
| | T-0 | 2.560915 | - | a2 |

Fonte: Autor

Tabela 62 - Resultados do teste de Tukey para as massas específicas dos concretos com resíduo de resina

| Parâmetros | Traços | Médias | Resultados | |
|--------------|---------------------|----------|------------|----|
| ρ_s | T _R -2% | 2.271371 | a1 | - |
| | T _R -6% | 2.271411 | a1 | - |
| | T _R -10% | 2.271660 | a1 | - |
| | T-0 | 2.334946 | - | a2 |
| ρ_{sat} | T _R -10% | 2.358527 | a1 | - |
| | T _R -6% | 2.362681 | a1 | - |
| | T _R -2% | 2.365257 | a1 | - |
| | T-0 | 2.423145 | - | a2 |
| ρ_r | T _R -10% | 2.487896 | a1 | - |
| | T _R -6% | 2.499546 | a1 | - |
| | T _R -2% | 2.506788 | a1 | - |
| | T-0 | 2.560915 | - | a2 |

Fonte: Autor

O estudo realizado por Almeida (2017) não encontrou variações significativas das massas específicas secas e saturadas em relação aos teores de resíduo supracitados, com os resultados mantidos dentro da margem de erro.

No estudo elaborado por Santos e Ferrari (2019) também não foi constatada a influência estatística da incorporação dos resíduos de PVC, apesar de ser observada sua redução em relação ao concreto padrão, com seu valor mínimo no traço com teor de 10%.

De acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015a) os concretos com resíduo incorporado são classificados como normais, pois suas massas específicas secas, determinadas nos ensaios, se encontram entre 2.000 e 2.800 kg/m³. Além disso, o valor encontrado para as massas específicas cumpre os requisitos mínimos aplicáveis para pavimentos permeáveis de concreto, conforme NBR 16.416 (ABNT, 2015c), que estabelece um valor mínimo de 1.600 kg/m³ ou 1.6 g/ml.

Para o índice de vazios e absorção de água, a realização do teste de Tukey, no mesmo nível de significância supracitado, constatou que, para o policarbonato, o concreto se apresentou mais poroso com o teor de 6%, devido ao mesmo ter apresentado valores superiores aos demais traços. Em relação aos resíduos de resina, foram encontrados valores médios estatisticamente iguais.

Quanto às massas específicas, observou-se que a incorporação dos resíduos ocasionou uma queda no seu valor em relação ao concreto padrão, ou seja, o concreto tornou-se mais leve, mas permaneceu estatisticamente constante para os diferentes teores. Entretanto, consta uma exceção para a massa específica real (ρ_r) dos traços com policarbonato, onde os teores de 2% e 6% se mostraram estatisticamente iguais ao traço padrão, sendo o traço com 10% de

resíduo o único a apresentar divergência relevante em relação a T-0.

Mediante análises dos resultados encontrados no teste de Tukey, constatou-se que a incorporação de ambos os resíduos não influenciou de forma relevante para melhoria das características estudadas neste item, nos teores analisados. Entretanto, observou-se o crescimento de sua porosidade na incorporação de 6% de resíduo de policarbonato.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a redução da porosidade está diretamente associada à diminuição da relação água/cimento. O traço T_P-6% apresentou o maior volume de água adicionado para o resíduo de policarbonato, conforme relações água/cimento descritas na Tabela 51. Sendo assim, verifica-se que o acréscimo de água para ajuste da consistência, ocasionado pela substituição do agregado miúdo pelos resíduos utilizados, foi o responsável pela obtenção de um concreto mais poroso em relação aos demais traços. Bertolini (2010) menciona que estruturas porosas permitem a penetração de agentes agressivos presentes no ambiente contribuindo, assim, para a sua degradação interna. Desse modo, o crescimento de sua porosidade pode tornar o concreto inapropriado para aplicações como estruturas em concreto armado e pavimentação.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Esta pesquisa concentrou-se no desempenho do concreto mediante incorporação de dois tipos de resíduo polimérico, oriundos do processamento de lentes oftálmicas, em substituição ao agregado miúdo. Foram avaliadas a trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Além disso, também foram obtidas informações a respeito dos componentes químicos dos resíduos através do ensaio FTIR, além de características físicas como massa unitária e teor de umidade.

Quanto às características físicas, constatou-se que os resíduos de policarbonato não apresentavam homogeneidade no seu teor de umidade, visto que as quatro amostras ensaiadas apresentaram um desvio padrão de 48,53%, enquanto a resina obteve 3,31%. Tal fato tornou necessária sua secagem para uso no concreto, pois não há possibilidade de previsão do volume de água a ser adicionado. Também se verificou que os resíduos compostos por resina são bem mais densos em relação ao policarbonato, onde sua massa unitária o supera em, aproximadamente, 13 vezes. Apesar disso, seus valores não superam a massa unitária de nenhum dos componentes do concreto, possibilitando a obtenção de um material mais leve.

O ensaio FTIR constatou comportamentos semelhantes para ambos os resíduos, onde se constatou a presença do grupo hidroxila, além das ligações C=C, C-O e C-H alifática. Entretanto, também foi identificada a presença do grupo carbonila no resíduo de resina. Por se tratarem de resíduos, que também contém compostos empregados durante o processamento das lentes, não foi possível a identificação exata das classes nem dos compostos presentes nos mesmos. Entretanto, verificou-se uma possível presença de álcoois/fenóis no resíduo de policarbonato e ácidos carboxílicos nos resíduos de resina, devido aos grupos funcionais identificados.

Observou-se que a trabalhabilidade foi prejudicada pela adição dos resíduos em substituição à areia, pois, em todos os traços, foi necessário um maior volume de água para ser atingido o valor fixado para o abatimento, de 50 ± 10 mm. Tal fato contribuiu para o crescimento da relação água/cimento e, por consequência, na obtenção de um concreto mais poroso. Entretanto, todos os traços com o resíduo apresentaram relações água/cimento compatíveis com a classe III de agressividade ambiental, conforme estabelecido pelas normas técnicas brasileiras citadas neste trabalho, para emprego em estruturas de concreto armado.

A resistência característica à compressão, para ambos os resíduos, resultou em variações estatisticamente relevantes, em relação ao concreto padrão para os traços com teor

de 10%, constatado pelo teste de Tukey. Entretanto, os valores obtidos nos ensaios se mostram compatíveis para aplicação do concreto em pavimentos rígidos e pisos industriais, com exceção do traço com incorporação do resíduo de resina no teor de 10%. Além disso, também se verificou que a compatibilidade dos mesmos traços para aplicação em ambientes classe III, conforme estabelecido em norma.

Quanto à resistência característica à tração na flexão, o teste de Tukey mostrou divergências relevantes apenas no teor de 2% de resíduos em relação ao traço padrão. Os valores dos traços $T_P-2\%$, $T_R-6\%$ e $T_R-10\%$ se encontram abaixo do recomendado pelo DNIT para utilização em pavimentos rígidos. Todavia, todos os traços atingiram o limite mínimo recomendado para aplicação em pisos industriais e pavimentos permeáveis de concreto.

O uso do resíduo de policarbonato como agregados no concreto acarretou em crescimento significativo da absorção de água e índice de vazios apenas no teor de 6%, com o restante se mostrando estatisticamente iguais, de acordo com o teste de Tukey. O uso do resíduo de resina não resultou em variações relevantes dos parâmetros citados anteriormente. Vale salientar que os valores encontrados para a absorção de água foram compatíveis com o limite para uso em galerias celulares de concreto armado, inclusive para uso em redes de esgoto e efluentes industriais, conforme norma técnica brasileira.

As massas específicas apresentaram redução no seu valor como resultado da incorporação de ambos os resíduos. Entretanto não mostraram variações significantes em função do teor adicionado. Todavia, mediante os valores encontrados, os concretos foram classificados como normais, de acordo com os limites estabelecidos pela norma técnica brasileira. Além disso, os mesmos se encontraram dentro do limite necessário para a sua aplicação em pavimentos permeáveis de concreto.

Apesar das alterações geradas nos resultados, os materiais analisados nessa pesquisa mostram-se promissores para usos diversos como pavimentação, estruturas e galerias pluviais e de esgoto, pois diversos valores dos traços analisados se encontravam dentro dos parâmetros normativos recomendados. Entretanto, em função da possível presença de compostos no resíduo, além dos polímeros estudados nesta pesquisa, também se sugere um estudo para a verificação de propriedades químicas como volatilidade, combustibilidade, reatividade e solubilidade dos mesmos. Devido aos teores de resíduo usados neste trabalho não afetarem de forma relevante as propriedades do concreto, sugere-se avaliar o desempenho dos mesmos em teores acima de 10%.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, M. *et al.* A Comparative Study of Popular Concrete Mix Design Methods from Qualitative and Cost-Effective Point of View for Extreme Environment. **Arab J Sci Eng**, v. 41, issue 4, p. 1403-1412, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1946-9>.

AKCELRUD, L. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. 1. ed. Barueri: Manole, 2007.

ALBUQUERQUE, A.S. Agregados. *In*: BAUER, L.A.F. (Coord). **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 1, cap. 4, p. 63-120.

ALMEIDA, F.F. **Avaliação da utilização de Resíduos Eletroeletrônicos (REEE) incorporados ao concreto em substituição ao agregado graúdo**. 2017. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

ALMEIDA, G.S.G.; SOUZA, W.B. **Engenharia dos polímeros: tipos de aditivos, propriedades e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015.

ALTIDIS, M.E.D. **Desenvolvimento de lentes oftálmicas por fotopolimerização de compostos orgânicos**. 2010. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ARAÚJO, W.M.P. *et al.* Estudo da influência na concentração de fibras de polipropileno no concreto de alta resistência. *In*: HOLZMAN, H.A.; BISCAIA, R.V.B. (Orgs). **Ciência e engenharia de materiais e o desenvolvimento socioambiental**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. cap. 2, p. 12-23.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **BT-106**: Guia básico de utilização do cimento Portland. 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPQ (NBR 14725)**: Cimento Portland. [s.l.]: ABCP, 2016. Disponível em: <https://abcp.org.br/download/fispq-nbr-14725/>. Acesso em: 08 de Maio de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 11 de Julho de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 35**: Agregados leves para concreto estrutural — Especificação. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo

— Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo — Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467**: Agregados — Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto — Especificação. Rio de Janeiro, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9775**: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2009d.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9939**: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.142**: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de

Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.655**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.821**: Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.396**: Aduelas (galerias celulares) de concreto armado pré-moldadas – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.416**: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018c.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Anuário ANEPAC 2011**. São Paulo: ANEPAC, 2011. Disponível em: <https://www.anepac.org.br/publicacoes/anuario/item/125-anuario-2011>. Acesso em: 23 de Dezembro de 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Mercado de agregados no Brasil**. São Paulo: ANEPAC, 2015. Disponível em: <http://anepac.org.br/agregados/mercado/item/8-mercado-de-agregados-no-brasil>. Acesso em: 06 de Outubro de 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. **ANAPRE CP 001/2018**: Especificações básicas de concreto para pisos industriais. [s.l.], 2018. Disponível em: [http://www.anapre.org.br/pdfs/Site-Especificacoes_basicas_de_concreto_Pisos_Industriais_REV4_Gelmo_e_Membros_do_Comite\(arquivo%20limpo\).pdf](http://www.anapre.org.br/pdfs/Site-Especificacoes_basicas_de_concreto_Pisos_Industriais_REV4_Gelmo_e_Membros_do_Comite(arquivo%20limpo).pdf). Acesso em: 30 de Maio de 2021.

ASSUNÇÃO, J.W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região Noroestes do Paraná**. 2002. 234 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2012. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BENTO, R.C.; ROSSIGNOLO, J.A. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na

análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado. **Concreto & Construções**, ano XLI, n. 71, p. 74-81, 2013. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_71.pdf. Acesso em: 07 de Janeiro de 2020.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. Tradução de Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BETTHEIM, F. *et al.* **Introdução à química orgânica**. Tradução de Mauro de Campos Silva, Gianluca Camillo Azzellini. Revisão técnica de Gianluca Camillo Azzellini. 9 Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

BOGGIO, A.J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concreto de cimento Portland**. 2000. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BORGES, L.C.; FERREIRA, D.F. Poder e taxas de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-Newman-Keuls sob distribuições normal e não normais dos resíduos. **Revista de matemática e estatística**, v. 21, n. 1, p. 67-83, 2003. Disponível em: http://jaguar.fcav.unesp.br/RME/fasciculos/v21/v21_n1/A4_LiviaBorges.pdf. Acesso em: 22 de Maio de 2021.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentos rígidos**. 3 ed. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **NORMA DNIT 047/2004 – ES: Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2004a.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **NORMA DNIT 048/2004 – ES: Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2004b.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **NORMA DNIT 049/2004 – ES: Pavimento rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-deslizante – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2004c.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro – 2010**. Brasília: DNPM, 2010. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>. Acesso em: 06 de Outubro de 2019.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual – Produto – PIA-Produto 2005 a 2018**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-produto/tabelas>. Acesso em: 20 de Junho de 2021.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**.

Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, ano 147, p. 3-7, 3 de agosto de 2010.

BRITO, L.R.; ALMEIDA, A.F.M.; OLIVEIRA, F.H.L. Análise da correlação entre resistência à compressão axial e à tração na flexão em pavimentos rígidos. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 40, n. 2, p.1-18, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5020/23180730.2019.9812>.

CALLISTER JR, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Fundamentals of materials science: An integrated approach**. 5 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

CERQUEIRA, F.C. Controle estatístico da resistência à compressão do concreto. **Revista Tecnologia**, v. 21, n. 1, p.49-56, 2000. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/717>. Acesso em: 09 de janeiro de 2021.

COIMBRA, M.A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M.R. Estudo da influência de cimentos na fluência em concretos para a construção civil. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, p. 98-104, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132006000100015>.

CUNHA, A.L.X. **Reciclagem dos rejeitos da atividade de mariscagem: uso na indústria de blocos pré-moldados de concreto**. 2020. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

CRUZ, R.A. **Confecção de Lentes Acrílicas para o Ensino de Ótica**. 1997. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Física Aplicada) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DAFICO, D.A. **Contribuição ao estudo da dosagem do concreto de cimento Portland**. 1997. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

DIALLO, M.L. *et al.* Resistance of plastic ophthalmic lenses: The effect of base curve on different materials during static load testing. **Optometry and vision science**, v. 78, n. 7, p. 518-524, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1097/00006324-200107000-00015>.

ELICES, M.; ROCCO, C.G. Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 75, issue 13, p. 3839-3851, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.02.011>.

FERREIRA, G.E.; FONSECA JÚNIOR, C.A.F. Mercado de Agregados no Brasil. *In*: LUZ, A.B. ALMEIDA, S.L.M. (ed.). **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. cap. 2, pp. 09-33.

FOLLMAN, A.J. *et al.* Degradação de Sacolas Plásticas Convencionais e Oxibiodegradáveis. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 1, p. 186-192, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X24176>.

FONSECA JÚNIOR, E.A. **Análise da incorporação de materiais poliméricos em concretos: uma alternativa para a diminuição do aporte de plásticos no ambiente**. 2019. 74 f. Dissertação (Mestrado em Análise de Sistemas Ambientais) - Centro Universitário

CESMAC, Maceió.

FUSCO, P.B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 1ª Edição. Pini: São Paulo, 2008.

GALDINO, B.R. *et al.* Gerenciamento dos resíduos gerados na indústria de lentes oftálmicas. Estudo de caso: João Pessoa-PB. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE*, Vol. 05, 2017, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Ecogestão Brasil, 2017. p. 194-203. Disponível em: <http://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2017/trabalhos/pdf/congestas2017-et-01-020.pdf>. Acesso em: 30 de Julho de 2019.

GAMBHIR, M.L. **Concrete technology**. 5. ed. Nova Delhi: McGraw Hill Education, 2013.

GANGARAO, H.V.S.; TALY, N.; VIJAY, P.V. **Reinforced concrete design with FRP composites**. Boca Raton: CRC Press, 2007.

GIDRÃO, G.M.S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GONÇALVES, D.B. A gestão de resíduos da construção civil no município de Sorocaba-SP. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 2, p. 15-26, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.V11i2.35791>.

GRUBBA, D. **Materiais de construção: Para Gostar e Aprender**. 2. ed. Brasília: Createspace Independent Publishing Platform, 2016.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland**. 1987. 278 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1992.

JAHAGIRDAR, S.; PATKI, V.; METAN, S. Evaluation of Physical and Chemical Properties of OPC and PPC Cement. **International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)**, v. 8, issue 2S-11, p. 840-845, 2019. DOI: 10.35940/ijrte.B1138.0982S1119. Disponível em: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i2S11/B11380982S1119.pdf>. Acesso em: 29 de fevereiro de 2020.

KARTHIKEYAN, M. *et al.* Utilization of Waste Plastic in Concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 6, n. 4, p. 1400-1405, 2019. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V6/i4/IRJET-V6I4297.pdf>. Acesso em: 13 de janeiro de 2020.

KAWANO, Y. Espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho. *In: CANEVAROLO JR, S.V. (Coord.). Técnicas de caracterização de polímeros*. São Paulo:

Artliber Editora, 2003. cap. 01, pp. 17-39.

KLEIN, D. **Química orgânica: uma aprendizagem baseada em solução de problemas**. Tradução de Oswaldo Esteves Barcia e Edilson Clemente da Silva. 3. ed. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

KOSMATKA, S.H.; WILSON, M.L. **Design and Control of Concrete Mixtures: The guide to applications, methods, and materials**. 15. ed. Skokie: Portland Cement Association (PCA), 2011.

LEITE, A.M. **Avaliação do uso da macrofibra polimérica na composição de concreto para fins estruturais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

LEITE, A.R.A.; DIAS, J.C.O. Planejamento e controle do lead time para redução do prazo de entrega em uma organização do setor óptico. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 35, 2015, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ABEPRO, 2015. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_212_256_27314.pdf. Acesso em: 20 de Outubro de 2019.

LEITE, D.O.; PRADO, R.J. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, v. 34, n. 2, p. 1-9, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172012000200015>.

LERMEN, R.T. *et al.* Effect of Additives, Cement Type, and Foam Amount on the Properties of Foamed Concrete Developed with Civil Construction Waste. **Appl. Sci.**, v. 9, issue 15, 2998, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9152998>.

LIMA, C.I.V. *et al.* Concreto e suas inovações. **Cadernos de graduação: Ciências exatas e tecnológicas**, v. 1, n. 01, p. 31-40, 2014. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/fitsexatas/article/view/1285/755>. Acesso em: 09 de Janeiro de 2020.

LIMA, F.B.; BARBOZA, A.S.R.; GOMES, P.C.C. **Produção e controle de qualidade do concreto**. Maceió: EDUFAL, 2003.

LIMA, E.M.; FERNANDES, R.T.V.; DANTAS, S.L. Quantificação de CO₂ emitido decorrente dos materiais empregados na construção de uma residência unifamiliar. *In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA*, 5, 2018, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: CONFEA, 2018. Disponível em: http://www.confear.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/171_qdceddmencduru.pdf. Acesso em: 09 de Janeiro de 2020.

LINS, R. *et al.* A secagem em polímeros como alternativa simples para evitar o desenvolvimento de biofilme. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA*, 52, 2012, Recife. **Anais [...]**. Recife: ABQ, 2012. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2012/trabalhos/13/1464-14830.html>. Acesso em: 09 de Maio de 2021.

LUZ, A.B.; ALMEIDA, S.L.M. Uso e Especificações. *In*: LUZ, A.B. ALMEIDA, S.L.M. (ed.). **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. cap. 6, pp. 103-123.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. Atualização de João Bosco Medeiros. 9. Ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MARMITTI, B.A. *et al.* Estudo comparativo de métodos para dosagem de concreto. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 3, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: CONFEA, 2016. Disponível em: <https://www.confea.org.br/sites/default/files/uploads-imce/contecc2016/civil/estudo%20comparativo%20de%20m%C3%A9todos%20para%20dosagem%20de%20concreto.pdf>. Acesso em: 21 de Abril de 2020.

MARTINS, G.A.; DOMINGUES, O. **Estatística geral e aplicada**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

MCMURRY, J. **Química orgânica: volume 1**. Tradução de Noveritis do Brasil. Revisão técnica de Robson Mendes Matos. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. Tradução de Antônio Carmona Filho, Denise Carpena Coutinho dal Molin, Maria Alba Cincotto, Moema Ribas Silva, Mônica Prezzi, Paulo Roberto do Lago Helene e Silvia Maria de Souza Selmo. 1. Ed. São Paulo: Pini, 1994.

MESLIN, D. **Cadernos de óptica oftálmica: materiais & tratamentos**. Paris: Essilor Academy Europe, 2010.

MIRANDA, C.S.; SEO, E.S.M. Degradação de embalagens plásticas oxi-biodegradáveis e comuns. **Holos Enviroment**, v. 15, n. 02, p. 171-179, 2015. DOI: [/dx.doi.org/10.14295/holos.v15i2.10503](https://dx.doi.org/10.14295/holos.v15i2.10503).

MORSE, J.; LEUNG, J. **Comparative Analysis of Different Lens Materials**. 2013. Tese (Doutorado em Optometria) - Michigan College of Optometry, Ferris State University, Big Rapids.

NEVES, T.E. **Contribuições para a valorização de resíduos de plástico**. 2015. 116 f. Projeto (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEWEL, J. **Fundamentos da moderna engenharia e ciência dos materiais**. Tradução de José Roberto Moraes d'Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

NOBRE FILHO, P.A. *et al.* Impactos ambientais da extração de areia no canal ativo do Rio

Canindé, Paramoti, Ceará. **Revista de Geologia**, v. 24, n. 2, p. 126 - 135, 2011. Disponível em: <http://www.periodicos.ufc.br/geologia/article/view/1404>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2020.

OLIVEIRA, H.M. Cimento Portland. *In*: BAUER, L.A.F. (Coord). **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008a. v. 1, cap. 3, p. 35-62.

OLIVEIRA, H.M. Propriedades do Concreto Endurecido. *In*: BAUER, L.A.F. (Coord). **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008b. v. 1, cap. 10, p. 284-313.

OLIVEIRA, T.T.A. **Desenvolvimento de um concreto reforçado com fibras (CRF) híbridas de polipropileno**. 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

PARENTE, R.A. **Elementos estruturais de plástico reciclado**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PAVIA, D.L. *et al.* **Introdução à espectroscopia**. Tradução de Pedro Barros e Roberto Torrejon. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

PEDROSO, F.L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**, ano XXXVII, n. 53, p. 14-19, 2009. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf. Acesso em: 23 de Dezembro de 2019.

PELEGRIN, I. *et al.* Análise da incorporação de fibras de polipropileno recicladas em compósito concreto. *In*: Iberic Conference on Theoretical and Experimental Mechanics and Materials, 1, 2018, Porto. **Anais** [...]. Porto: FEUP/APAET/EEI-UVigo, 2018. p. 543-548. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~tem2/Proceedings_TEMM2018/data/papers/7394.pdf. Acesso em: 23 de Maio de 2021.

PEREIRA, V.M. **Permeabilidade ao ar do concreto**. 2011. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PERNAMBUCO. Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco. **Diagnóstico: Destinação de Resíduos Sólidos em PE 2020**. Disponível em: <https://www.tce.pe.gov.br/internet/index.php/estudos-e-levantamentos-novo>. Acesso em: 11 de Julho de 2021.

PIATTI, T.M.; RODRIGUES, R.A.F. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió: EDUFAL, 2005.

PINHEIRO, A.C.F.B.; CRIVELARO, M. **Materiais de construção**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2020.

PITTA, M.R. **Construção de pavimentos de concreto simples**. 3. ed. São Paulo: ABCP, 1998.

RABELO, N.M.A. GARCIA, C.R. Comportamento do concreto mediante a adição de pozolana artificial. **E-xacta**, v. 6, n. 1, p. 55-66, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v6i1.953>.

RECENA, F.A.P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 4. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017.

RECIFE. Portal de Dados Abertos da Prefeitura de Recife. **Empresas da Cidade do Recife**. Recife: Secretaria de Finanças, 2021. Disponível em: <http://dados.recife.pe.gov.br/dataset/empresas-da-cidade-do-recife>. Acesso em: 20 de Junho de 2021.

RIBEIRO, D.V. Deterioração das estruturas de concreto. *In*: RIBEIRO, D.V. (Coord). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. cap. 7, p. 178-187.

RICCI, B.O.L.; PEREIRA, A.M.; AKASAKI, J.L. Estudo de Dosagens Visando Obter Concretos para Obras de Pequeno Porte. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 13, n. 1, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17271/1980082713120171499>.

RODRIGUES, P.P.F. **ET-67: Parâmetros de dosagem do concreto**. 2. ed. rev. atual. São Paulo: ABCP, 1995.

ROHDEN, A.B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROTH, C.G.; GARCIAS, C.M. Construção civil e a degradação ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, v. 7, n. 13, p. 111-128, 2009. DOI: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2009.13.111-128>.

RUIVINHO, C.I.C.C. **Valorização dos resíduos de lentes oftálmicas orgânicas**. 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade do Algarve, Faro.

SAMPIERI, R. H. *et al.* **Metodologia de Pesquisa**. Tradução de Daisy Vaz de Moraes. . Revisão técnica de Ana Gracinda Queluz Garcia, Dirceu da Silva e Marcos Júlio. 5. Ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

SANTIAGO, G.T. *et al.* Incorporação de fibras de polipropileno recicladas em compósito concreto. *In*: TULLIO, F.B.M; MACHADO, L.M.B. (Orgs.). **As engenharias agregando conhecimento em setores emergentes de pesquisa e desenvolvimento**. Ponta Grossa: Atena, 2021. cap. 9, p. 96-104.

SANTIAGO, W.C.; BECK, A.T. Um novo estudo da conformidade da resistência do concreto

produzido no Brasil. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v. 10, n. 4, p. 906-923, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952017000400008>.

SANTOS, A.A.M. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção**. 2016. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana.

SANTOS, A.G. FERRARI, A.K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, pp. 39-51, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300323>.

SARTORTI, A. L. *et al.* Influência do agregado miúdo na resistência à compressão do concreto. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 19, n. 1, 2019. Disponível em: <http://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/11423>. Acesso em: 12 de Abril de 2020.

SCHETTINO, R.M. **Concreto com adição de fibras de politereftalato de etileno**. 2015. 65 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

SCHILIVE, P.M.S *et al.* Blocos de concreto com resíduos de PET: alternativa para sustentabilidade urbana. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, n. 31, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n31.2021.03>

SHIMADZU CORPORATION®. **Fourier Transform Infrared Spectrophotometer IRTracer-100**. [s.l.: s.n.], 2017. Disponível em: https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochures/10378/285_c103e091b.pdf. Acesso em: 21 de abril de 2021.

SILVA, A.R. **Confecção e Caracterização Óptica e Estrutural de Lentes Plásticas Obtidas pelo Processo de Injeção**. 2002. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, C.M.M.A. *et al.* Influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades do concreto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22, 2016, Natal. **Anais [...]**. Natal: Metallum Congressos Técnicos e Científicos, 2016. p. 1790-1798. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/109-057.pdf>. Acesso em: 12 de Abril de 2020.

SILVA, J.B. **Avaliação do desempenho de blocos de concreto estrutural dosados com politereftalato etileno (PET) micronizado**. 2016. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SILVA, J.H. **Incorporação de cinza de biomassa, decorrente da queima em caldeiras de lavanderias de jeans do agreste de Pernambuco, no concreto**. 2021. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de

Santo Agostinho.

SILVERSTEIN, R.M. *et al.* **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos.** Tradução de Ricardo Bicca de Alencastro. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2013.** Rio de Janeiro: SNIC, 2013. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf. Acesso em: 19 de Maio de 2020.

SMITH, W.F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais.** Tradução de Necesio Gomes Costa, Ricardo Dias Martins de Carvalho e Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

SOBRAL, E.S. Propriedades do Concreto Fresco. *In:* BAUER, L.A.F. (Coord). **Materiais de Construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 1, cap. 9, p. 267-283.

SOUSA, C.A.; LIRA JUNIOR, M.A.; FERREIRA, R.L.C. Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 350-354, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2012000300008>.

SOUTHIER, J.S.; ZANELLA, C. A gestão de processos no ramo óptico: um estudo de caso em um laboratório de lentes do oeste de Santa Catarina. *In:* SEMEAD – SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO, 20, 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: PPGA/FEA/USP, 2017. Disponível em: <http://login.semead.com.br/20semead/anais/arquivos/2288.pdf>. Acesso em: 21 de Outubro de 2019.

SOUZA, A. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto – SP.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SOUZA, G.M.C.; ABREU, R.F.A.; MORAIS, T.A. Valorização das aparas geradas no corte de lentes oftálmicas orgânicas pela adição em concreto. *In:* CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2, 2015, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: CONFEA, 2015. Disponível em: <https://www.confea.org.br/index.php/eventos/contecc/contecc-2015>. Acesso em: 21 de Abril de 2020.

SOUZA, M.F.L.; SILVA, C.E. A importância do controle de qualidade em laboratório ótico. **Management Journal**, v. 1, n. 1, p. 12-25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2674-6417.2019.001.0002>.

SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Quím. Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422005000100014>.

SUZIN, C.M. **Materiais de construção civil: metais, orgânicos e cerâmicos.** Indaial: UNIASSSELVI, 2020.

TARECO, R.F.N. **Identificação de polímeros termoplásticos com espectroscopia de infravermelhos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

THORNEYCROFT, J. *et al.* Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 63–69, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>.

TORALLES, B.M. Estudo comparativo de diferentes métodos de dosagem de concretos convencionais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10, n. 1, p. 184-198, 2018. Disponível em: <https://www.revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/view/11985>. Acesso em: 06 de Maio de 2020.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P.R.L. Dosagem dos concretos de cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 12, p. 415-451.

VIDALES, L.T. **Contribuição ao ecodesign (DfE) a partir de propriedades de blendas de PC/PMMA em sucessivos ciclos de processamento: estudo de caso de óculos oriundos de apreensão da Receita Federal do Brasil**. 2013. 135 p. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VIEIRA, B.P. *et al.* Estudo quali-quantitativo de resíduos em manguezal de Florianópolis – SC. *In*: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR, 14, 2011, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Balneário Camboriú: ALICMAR/AOCEANO, 2011. p. 18-20. Disponível em: <https://www.aoceano.org.br/downloads>. Acesso em: 06 de Dezembro de 2019.

VILANE, B.R.T.; SABELO, N. The Effect of Aggregate Size on the Compressive Strength of Concrete. **Journal of Agricultural Science and Engineering**, v. 2, n. 6, p. 66-69, 2016. Disponível em: <http://files.aiscience.org/journal/article/html/70030252.html>. Acesso em: 16 de Abril de 2020.

ZANELLA, L.C.H. **Metodologia de pesquisa**. 2. ed. rev. atual. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/UFSC, 2011.

ANEXO A – Laudo fornecido pelo fabricante do cimento

| DATA/MÊS | ENSAIOS QUÍMICOS | | | | | | | | | | ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS | | | | | | | | | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 7215/28.02.2019 | | |
|------------|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|---------------------------|-------|-------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|------------|----------------|-------------|---------|------------------|---------------|--|---------------|----------------|
| | P.F. - Perda ao Fogo | R.I. - Res. Insolúvel | SiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | CaO | MgO - Óxido de Magnésio | SO3 (Trióxido de Enxofre) | Na2O | K2O | # 0,075mm (#200) | # 0,04mm (#325) | Blaine | Massa Específica | Água (C.N) | Início de Pega | Fim de Pega | Expans. | 1 Dia (N.A. Mpa) | 3 Dias 10 Mpa | | 7 Dias 20 Mpa | 28 Dias 32 Mpa |
| | ≤ 8,50 %(*) | ≤ 18,50 %(*) | NA(*) | NA(*) | NA(*) | NA(*) | NA(*) | ≤ 4,30(*) | NA(*) | NA(*) | ≤ 12,0 % | N.A. (%) | ≥ 2800 Cm ² /g | g/cm ³ | % | ≥ 1 h | ≤ 10 h | ≤ 5 mm | 10-12 Mpa | 22-24 Mpa | | 26-28 Mpa | 35-37 Mpa |
| 19/09/2019 | 8,19 | 9,10 | 20,21 | 5,28 | 2,10 | 54,83 | 4,22 | 3,34 | 0,24 | 0,92 | 3,4 | 8,7 | 4350 | 3,02 | 27,2 | 3,00 | 4,00 | 0,0 | 12,2 | 23,2 | 29,5 | 35,4 | |
| 21/09/2019 | 8,44 | 8,90 | 18,61 | 4,92 | 2,07 | 55,71 | 4,48 | 2,88 | 0,21 | 0,95 | 3,4 | 8,4 | 4560 | 3,02 | 27,2 | 2,56 | 3,50 | 0,0 | 12,8 | 23,2 | 27,3 | 35,0 | |
| 23/09/2019 | 8,40 | 10,83 | 19,46 | 5,08 | 2,13 | 55,43 | 4,29 | 3,43 | 0,23 | 0,90 | 3,5 | 8,8 | 4490 | 3,02 | 26,9 | 2,50 | 3,45 | 0,5 | 13,5 | 24,3 | 28,0 | 35,5 | |
| 24/09/2019 | 8,00 | 11,04 | 19,22 | 4,82 | 2,15 | 55,44 | 4,52 | 3,33 | 0,17 | 1,01 | 3,5 | 8,8 | 4510 | 3,02 | 26,7 | 3,10 | 3,50 | 0,5 | 12,8 | 24,2 | 29,1 | 35,1 | |
| 25/09/2019 | 8,45 | 11,85 | 20,23 | 5,29 | 2,19 | 55,69 | 4,59 | 3,44 | 0,23 | 1,01 | 3,3 | 8,5 | 4380 | 3,02 | 27,0 | 2,56 | 4,00 | 0,0 | 12,4 | 24,7 | 28,4 | 34,8 | |
| 26/09/2019 | 7,50 | 10,87 | 21,47 | 5,39 | 2,19 | 53,73 | 4,41 | 3,47 | 0,21 | 1,01 | 3,7 | 9,3 | 4410 | 3,02 | 26,9 | 2,50 | 4,00 | 0,0 | 12,7 | 23,4 | 27,8 | 35,4 | |
| 28/09/2019 | 8,49 | 10,24 | 20,82 | 5,43 | 2,15 | 53,39 | 4,39 | 3,30 | 0,25 | 1,00 | 4,2 | 10,0 | 4280 | 3,02 | 26,7 | 3,00 | 4,15 | 0,0 | 10,8 | 22,5 | 26,8 | 34,9 | |
| 30/09/2019 | 8,13 | 9,10 | 20,02 | 5,23 | 2,10 | 53,93 | 4,40 | 3,31 | 0,26 | 0,89 | 4,0 | 9,9 | 4360 | 3,02 | 26,9 | 3,05 | 4,05 | 0,0 | 11,2 | 22,0 | 26,4 | 35,0 | |
| 01/10/2019 | 8,03 | 8,90 | 18,93 | 4,74 | 2,18 | 55,60 | 4,64 | 3,24 | 0,16 | 0,97 | 3,3 | 8,8 | 4410 | 3,02 | 27,3 | 3,00 | 3,55 | 0,0 | 13,2 | 23,2 | 28,4 | 35,4 | |
| 02/10/2019 | 8,46 | 10,83 | 19,96 | 5,21 | 2,08 | 52,39 | 4,87 | 3,22 | 0,23 | 1,02 | 3,7 | 9,6 | 4560 | 3,02 | 27,0 | 2,56 | 3,50 | 0,0 | 10,0 | 22,7 | 26,0 | 35,6 | |
| 03/10/2019 | 7,98 | 10,88 | 21,33 | 5,40 | 2,23 | 52,23 | 4,71 | 3,27 | 0,22 | 1,14 | 3,2 | 8,1 | 4650 | 3,02 | 26,9 | 2,50 | 4,00 | 0,5 | 10,1 | 23,0 | 26,5 | 35,2 | |
| 05/10/2019 | 8,43 | 12,82 | 23,90 | 6,18 | 2,28 | 48,38 | 4,61 | 3,64 | 0,33 | 1,03 | 2,5 | 8,7 | 4760 | 3,02 | 27,0 | 2,56 | 3,55 | 0,5 | 10,2 | 24,0 | 26,2 | 35,8 | |
| 07/10/2019 | 8,34 | 13,80 | 22,34 | 5,51 | 2,25 | 51,57 | 4,45 | 3,28 | 0,26 | 1,08 | 2,4 | 8,8 | 4680 | 3,02 | 27,4 | 2,50 | 3,50 | 0,5 | 11,5 | 22,2 | 26,2 | 35,8 | |
| 08/10/2019 | 8,40 | 14,28 | 22,86 | 5,70 | 2,28 | 50,83 | 4,55 | 3,16 | 0,30 | 1,03 | 2,4 | 8,6 | 4750 | 3,02 | 27,3 | 3,10 | 3,45 | 0,5 | 10,7 | 22,5 | 26,5 | 35,6 | |
| 09/10/2019 | 8,34 | 10,85 | 21,38 | 5,50 | 2,18 | 52,38 | 4,58 | 2,82 | 0,26 | 1,04 | 2,3 | 9,4 | 4780 | 3,02 | 27,4 | 2,50 | 3,50 | 0,5 | 11,3 | 22,4 | 26,0 | 35,5 | |
| 10/10/2019 | 8,27 | 11,59 | 21,56 | 5,53 | 2,17 | 51,90 | 4,40 | 3,24 | 0,26 | 1,00 | 2,5 | 8,5 | 4790 | 3,02 | 27,5 | 3,00 | 4,00 | 0,5 | 10,0 | 22,0 | 26,7 | 35,0 | |
| 11/10/2019 | 7,91 | 14,07 | 22,61 | 5,56 | 2,29 | 51,25 | 4,35 | 3,17 | 0,29 | 1,02 | 3,4 | 9,6 | 4810 | 3,02 | 27,5 | 3,20 | 4,00 | 0,5 | 10,1 | 22,6 | 26,2 | 35,8 | |
| 14/10/2019 | 8,36 | 13,97 | 22,63 | 5,63 | 2,29 | 51,46 | 4,42 | 3,12 | 0,24 | 1,08 | 2,8 | 8,1 | 4700 | 3,02 | 27,4 | 2,55 | 4,15 | 0,5 | 10,2 | 22,5 | 26,0 | 35,4 | |
| 15/10/2019 | 7,93 | 14,70 | 23,30 | 5,99 | 2,30 | 50,64 | 4,57 | 3,27 | 0,30 | 1,01 | 2,3 | 8,8 | 4800 | 3,02 | 27,5 | 2,50 | 4,05 | 1,0 | 10,5 | 22,8 | 26,0 | 35,0 | |
| 16/10/2019 | 8,13 | 12,88 | 21,94 | 5,47 | 2,21 | 52,28 | 4,56 | 2,82 | 0,25 | 1,01 | 2,7 | 8,2 | 4950 | 3,02 | 27,4 | 3,00 | 3,55 | 0,5 | 10,0 | 22,6 | 26,2 | 35,5 | |
| 17/10/2019 | 8,00 | 12,12 | 21,97 | 5,49 | 2,27 | 51,65 | 4,50 | 3,26 | 0,22 | 1,03 | 2,6 | 8,2 | 4730 | 3,02 | 27,4 | 2,55 | 3,50 | 0,5 | 10,1 | 23,0 | 26,6 | 35,5 | |
| 18/10/2019 | 7,90 | 11,59 | 20,91 | 5,47 | 2,16 | 51,63 | 4,58 | 3,34 | 0,25 | 1,09 | 2,2 | 8,0 | 4720 | 3,02 | 27,5 | 2,55 | 3,55 | 0,5 | 10,9 | 22,8 | 27,0 | 35,0 | |
| 21/10/2019 | 8,41 | 14,32 | 22,87 | 5,99 | 2,19 | 50,70 | 4,69 | 3,13 | 0,29 | 1,08 | 2,3 | 8,3 | 4130 | 3,02 | 27,2 | 2,50 | 3,50 | 0,5 | 10,4 | 23,0 | 26,4 | 35,0 | |
| 22/10/2019 | 7,77 | 16,15 | 23,44 | 5,94 | 2,19 | 50,92 | 4,35 | 3,39 | 0,29 | 0,96 | 2,7 | 10,0 | 4280 | 3,02 | 27,3 | 3,10 | 3,45 | 0,5 | 10,0 | 22,1 | 27,3 | 35,0 | |
| 23/10/2019 | 8,38 | 11,11 | 20,86 | 5,24 | 2,18 | 54,59 | 4,34 | 2,77 | 0,23 | 0,98 | 2,6 | 8,7 | 4270 | 3,02 | 27,4 | 2,50 | 3,50 | 0,0 | 10,8 | 22,4 | 26,2 | 35,0 | |
| 24/10/2019 | 8,12 | 10,73 | 18,72 | 5,00 | 2,08 | 55,65 | 4,21 | 3,49 | 0,21 | 0,90 | 2,2 | 7,7 | 4480 | 3,02 | 27,2 | 3,00 | 4,00 | 0,0 | 11,6 | 23,5 | 28,0 | 35,0 | |
| 26/10/2019 | 8,00 | 10,34 | 16,01 | 4,31 | 1,93 | 56,76 | 4,17 | 3,07 | 0,16 | 1,04 | 2,6 | 8,7 | 4700 | 3,02 | 26,8 | 3,20 | 4,00 | 0,5 | 10,9 | 22,7 | 26,6 | 35,0 | |
| 28/10/2019 | 7,98 | 10,20 | 19,43 | 5,23 | 2,10 | 56,13 | 4,31 | 2,94 | 0,21 | 0,99 | 2,9 | 8,7 | 4540 | 3,02 | 27,2 | 2,56 | 4,15 | 0,0 | 11,8 | 24,6 | 29,8 | 35,0 | |
| 29/10/2019 | 7,93 | 10,10 | 18,63 | 5,12 | 2,03 | 55,75 | 4,43 | 3,32 | 0,19 | 0,96 | 3,1 | 10,6 | 4450 | 3,02 | 27,3 | 2,50 | 4,05 | 0,0 | 10,2 | 22,4 | 26,4 | 35,0 | |
| 30/10/2019 | 8,34 | 13,90 | 21,56 | 5,53 | 2,17 | 51,90 | 4,40 | 3,24 | 0,26 | 1,00 | 2,6 | 9,4 | 4380 | 3,02 | 27,4 | 3,00 | 3,55 | 0,0 | 11,4 | 24,5 | 28,4 | 35,0 | |
| 31/10/2019 | 8,40 | 14,28 | 22,81 | 5,56 | 2,29 | 51,25 | 4,35 | 3,17 | 0,26 | 1,02 | 2,8 | 9,4 | 4490 | 3,02 | 27,2 | 2,56 | 3,50 | 0,0 | 10,5 | 22,6 | 28,7 | 35,0 | |
| 02/11/2019 | 8,34 | 10,85 | 22,63 | 5,63 | 2,29 | 51,46 | 4,42 | 3,12 | 0,24 | 1,08 | 2,6 | 9,7 | 4580 | 3,02 | 27,2 | 3,00 | 4,00 | 0,0 | 10,4 | 22,9 | 29,2 | 35,0 | |
| 04/11/2019 | 7,88 | 10,19 | 20,93 | 5,58 | 2,08 | 53,76 | 4,53 | 3,29 | 0,24 | 1,11 | 2,4 | 8,7 | 4620 | 3,02 | 26,9 | 2,50 | 4,05 | 0,0 | 11,7 | 22,4 | 26,4 | 35,0 | |
| 05/11/2019 | 8,44 | 11,47 | 20,16 | 5,16 | 2,08 | 54,18 | 4,75 | 3,20 | 0,18 | 0,99 | 2,4 | 8,9 | 4500 | 3,02 | 26,0 | 2,55 | 3,55 | 0,0 | 10,0 | 22,2 | 26,4 | 35,0 | |
| 06/11/2019 | 8,40 | 11,73 | 20,20 | 5,43 | 2,07 | 53,67 | 4,70 | 3,80 | 0,23 | 1,06 | 2,0 | 8,0 | 4500 | 3,02 | 27,2 | 2,55 | 3,50 | 0,0 | 11,7 | 24,7 | 26,4 | 35,0 | |
| 07/11/2019 | 8,34 | 10,20 | 19,00 | 5,12 | 2,03 | 55,68 | 4,43 | 3,32 | 0,19 | 0,96 | 2,0 | 8,2 | 4340 | 3,02 | 27,0 | 2,55 | 3,50 | 0,0 | 11,3 | 22,6 | 26,4 | 35,0 | |
| MÉDIA | 8,19 | 11,68 | 20,93 | 5,38 | 2,17 | 53,22 | 4,50 | 3,23 | 0,24 | 1,01 | 2,85 | 8,92 | 4546 | 3,02 | 27,21 | 2,57 | 3,56 | 0,3 | 11,1 | 23,0 | 27,3 | 35,3 | |
| MINIMO | 7,50 | 8,90 | 16,01 | 4,31 | 1,93 | 48,38 | 4,17 | 2,77 | 0,16 | 0,89 | 2,00 | 7,70 | 4130 | 3,02 | 26,70 | 2,50 | 3,45 | 0,0 | 10,0 | 22,0 | 26,0 | 34,5 | |
| MAXIMO | 8,49 | 15,15 | 23,90 | 6,18 | 2,30 | 56,76 | 4,98 | 3,64 | 0,33 | 1,14 | 4,20 | 10,60 | 4950 | 3,02 | 28,00 | 3,20 | 4,15 | 1,0 | 13,5 | 24,7 | 29,8 | 35,8 | |
| DESVPAD. | 0,25 | 1,79 | 1,69 | 0,37 | 0,09 | 2,11 | 0,20 | 0,20 | 0,04 | 0,06 | 0,57 | 0,69 | 1,89 | 0,00 | 0,27 | 0,08 | 0,28 | 1,02 | 0,81 | 1,18 | 0,32 | | |

NA - sem exigência de norma

(*) ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Requisitos - primeira edição: 03.07.2018 - Aprovada pelo Comitê ABNT.

Alhambra-PB, 11 de novembro de 2019



Av. Gleba Andreza Mucatu, S/N, Lote Parcela 4A
Zona Rural - Alhambra - PB - Brasil | CEP 58320-000
Fone/Fax: 55 (63) 3365.5001 | grupo@elizabeth.com.br



Josemarcelino dos Santos
Coordenador de Qualidade
Gerente de Cont. Qualidade
Elizabeth Cimentos LTDA.



RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NBR 7215/28.02.2019

APÊNDICE A – Ensaio dos componentes do concreto

|  Determinação da massa específica do cimento Portland – NBR 16.605  | | |
|---|------------------------|------------------------|
| Parâmetros | Amostra 1 | Amostra 2 |
| $V_1 =$ | 1,10 cm ³ | 1,10 cm ³ |
| $V_2 =$ | 20,60 cm ³ | 20,55 cm ³ |
| $m =$ | 60,00 g | 60,00 g |
| $V = V_2 - V_1 =$ | 19,50 cm ³ | 19,45 cm ³ |
| $\rho =$ | 3,08 g/cm ³ | 3,08 g/cm ³ |

|  Determinação da massa específica do agregado miúdo – NBR NM 52  | | |
|--|------------------------|------------------------|
| Parâmetros | Amostra 1 | Amostra 2 |
| $m_s =$ | 500,00 g | 500,00 g |
| $m_1 =$ | 690,00 g | 690,00 g |
| $m_2 =$ | 990,00 g | 990,00 g |
| $m =$ | 495,00 g | 499,00 g |
| $\rho_a =$ | 1,00 g/cm ³ | 1,00 g/cm ³ |
| $V_a =$ | 300,00 cm ³ | 300,00 cm ³ |
| $V =$ | 500,00 cm ³ | 500,00 cm ³ |
| $d_1 =$ | 2,48 g/cm ³ | 2,50 g/cm ³ |
| $d_2 =$ | 2,50 g/cm ³ | 2,50 g/cm ³ |
| $d_3 =$ | 2,54 g/cm ³ | 2,51 g/cm ³ |

|  Determinação da massa unitária do agregado miúdo – NBR NM 45  | | |
|--|---------------------------|---------------------------|
| Parâmetros | Amostra 1 | Amostra 2 |
| $m_{ar} =$ | 17,99 kg | 17,99 kg |
| $m_r =$ | 0,36 kg | 0,36 kg |
| $V =$ | 0,012843 m ³ | 0,012843 m ³ |
| $\rho_{ap} =$ | 1372,72 kg/m ³ | 1372,72 kg/m ³ |

|  Determinação da umidade do agregado miúdo – NBR 9775  | | |
|--|-----------|-----------|
| Parâmetros | Amostra 1 | Amostra 2 |
| $v =$ | 406,00 mL | 406,00 mL |
| $\gamma =$ | 2,50 g/mL | 2,50 g/mL |
| $h =$ | 2,04 % | 2,04 % |

|  Determinação da massa específica e absorção do agregado graúdo – NBR NM 53  | | |
|--|------------------------|------------------------|
| Parâmetros | Amostra 1 | Amostra 2 |
| $m_s =$ | 3005 g | 3005 g |
| $m_a =$ | 1720 g | 1885 g |
| $m =$ | 2990 g | 2995 g |
| $d =$ | 2,35 g/cm ³ | 2,70 g/cm ³ |
| $d_s =$ | 2,34 g/cm ³ | 2,68 g/cm ³ |
| $d_a =$ | 2,33 g/cm ³ | 2,67 g/cm ³ |
| $A =$ | 0,50 % | 0,33 % |

|  Determinação da massa unitária do agregado graúdo – NBR NM 45  | | |
|---|---------------------------|---------------------------|
| Parâmetros | Amostra 1 | Amostra 2 |
| $m_{ar} =$ | 19,41 kg | 19,41 kg |
| $m_r =$ | 0,36 kg | 0,36 kg |
| $V =$ | 0,012843 m ³ | 0,012843 m ³ |
| $\rho_{ap} =$ | 1483,29 kg/m ³ | 1483,29 kg/m ³ |

| Parâmetros | | Amostra 1 |
|------------|-------------|-----------|
| | $m_i =$ | 3780 g |
| | $m_f =$ | 3765 g |
| | Umidade (%) | 0,40 % |

APÊNDICE B – Ensaio de resistência à compressão traço padrão (T-0)

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | |
|---|----------|--|--------------------|------------|---|-------------|--------------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Força (kg) | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Resistência à compressão (MPa) |
| T0 | 1 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 26.920,00 | 10,00 | 21,00 | 34,2756 |
| T0 | 1 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 28.290,00 | 10,00 | 20,00 | 36,0199 |
| T0 | 1 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 24.030,00 | 9,90 | 20,00 | 31,2172 |
| T0 | 1 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 24.780,00 | 10,00 | 20,00 | 31,5509 |
| T0 | 1 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 26.510,00 | 10,00 | 21,00 | 33,7536 |
| T0 | 1 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 25.180,00 | 10,00 | 19,00 | 32,0602 |
| T0 | 2 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 24.610,00 | 9,90 | 20,00 | 31,9706 |
| T0 | 2 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 24.860,00 | 10,00 | 20,00 | 31,6527 |
| T0 | 2 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 27.350,00 | 10,10 | 19,00 | 34,1369 |
| T0 | 2 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 25.440,00 | 10,00 | 20,00 | 32,3912 |
| T0 | 2 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 25.820,00 | 10,00 | 20,00 | 32,8750 |
| T0 | 2 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | 27.130,00 | 10,00 | 20,00 | 34,5430 |
| T0 | 3 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | 27.830,00 | 10,00 | 20,00 | 35,4343 |
| T0 | 3 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | 27.950,00 | 9,90 | 20,00 | 36,3096 |
| T0 | 3 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | 28.540,00 | 9,90 | 20,00 | 37,0761 |
| T0 | 4 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | 29.910,00 | 9,90 | 20,00 | 38,8558 |
| T0 | 4 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | 29.070,00 | 9,90 | 20,00 | 37,7646 |
| T0 | 5 | 17/08/2020 | 14/09/2020 | 29.110,00 | 10,00 | 20,00 | 37,0640 |
| T0 | 5 | 17/08/2020 | 14/09/2020 | 26.350,00 | 10,00 | 20,00 | 33,5499 |
| T0 | 5 | 17/08/2020 | 14/09/2020 | 30.480,00 | 10,00 | 20,00 | 38,8083 |

APÊNDICE C – Ensaios de resistência à compressão traço T_p-2%

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | |  | | | |
|---|----------|--|--------------------|--|---------------|-------------|--------------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Força (kg) | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Resistência à compressão (MPa) |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 27.450,00 | 9,90 | 19,90 | 35,6601 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 26.030,00 | 9,90 | 20,00 | 33,8154 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 28.170,00 | 10,00 | 19,80 | 35,8672 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 28.520,00 | 9,90 | 19,80 | 37,0501 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 28.310,00 | 9,90 | 19,90 | 36,7773 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 29.120,00 | 9,90 | 20,10 | 37,8295 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 28.200,00 | 9,90 | 19,90 | 36,6344 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 28.370,00 | 9,90 | 19,90 | 36,8552 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 28.460,00 | 9,80 | 20,00 | 37,7305 |
| T _p -2% | 1 | 16/09/2020 | 14/10/2020 | 27.560,00 | 9,80 | 19,90 | 36,5374 |

APÊNDICE D – Ensaio de resistência à compressão traço T_p-6%

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | |  CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS | | | |
|---|----------|--|--------------------|---|---------------|-------------|--------------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Força (kg) | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Resistência à compressão (MPa) |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 26.980,00 | 10,00 | 19,90 | 34,3520 |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 26.390,00 | 9,80 | 20,00 | 34,9862 |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 26.270,00 | 10,00 | 20,10 | 33,4480 |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 26.820,00 | 9,90 | 20,00 | 34,8416 |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 25.090,00 | 9,90 | 19,90 | 32,5942 |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 25.210,00 | 9,80 | 19,90 | 33,4219 |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 25.170,00 | 9,90 | 20,10 | 32,6981 |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 26.870,00 | 9,80 | 19,90 | 35,6226 |
| T _p -6% | 1 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 27.400,00 | 10,00 | 20,00 | 34,8868 |
| T _p -6% | 2 | 08/10/2020 | 05/11/2020 | 24.300,00 | 9,90 | 19,90 | 31,5679 |

APÊNDICE E – Ensaio de resistência à compressão traço T_p-10%

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|---|---------------|-------------|--------------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Força (kg) | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Resistência à compressão (MPa) |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 27.470,00 | 9,80 | 20,10 | 36,4180 |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 27.970,00 | 9,90 | 20,00 | 36,3356 |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 28.950,00 | 9,90 | 19,80 | 37,6087 |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 29.340,00 | 9,80 | 20,00 | 38,8972 |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 27.600,00 | 10,00 | 20,10 | 35,1414 |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 28.370,00 | 9,90 | 20,00 | 36,8552 |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 31.080,00 | 10,00 | 19,90 | 39,5723 |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 28.360,00 | 10,00 | 19,90 | 36,1091 |
| T _p -10% | 1 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 30.410,00 | 10,00 | 20,10 | 38,7192 |
| T _p -10% | 2 | 04/11/2020 | 02/12/2020 | 27.990,00 | 10,00 | 20,20 | 35,6380 |

APÊNDICE F – Ensaio de resistência à compressão traço $T_R-2\%$

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | |  CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS | | | |
|---|----------|--|--------------------|---|---------------|-------------|--------------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Força (kg) | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Resistência à compressão (MPa) |
| $T_R-2\%$ | 1 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 27.100,00 | 9,90 | 20,00 | 35,2054 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 28.980,00 | 10,00 | 20,00 | 36,8985 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 25.790,00 | 9,80 | 20,20 | 34,1908 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 29.960,00 | 9,90 | 19,90 | 38,9208 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 28.230,00 | 9,90 | 20,10 | 36,6734 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 28.440,00 | 10,00 | 20,00 | 36,2109 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 27.670,00 | 10,00 | 20,00 | 35,2305 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 28.020,00 | 9,90 | 19,90 | 36,4005 |
| $T_R-2\%$ | 2 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 30.430,00 | 10,00 | 19,90 | 38,7447 |
| $T_R-2\%$ | 2 | 21/09/2020 | 19/10/2020 | 26.810,00 | 9,90 | 20,10 | 34,8286 |

APÊNDICE G – Ensaio de resistência à compressão traço $T_R-6\%$

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|---|---------------|-------------|--------------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Força (kg) | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Resistência à compressão (MPa) |
| $T_R-6\%$ | 1 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 25.760,00 | 9,90 | 19,80 | 33,4646 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 24.320,00 | 10,00 | 19,90 | 30,9652 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 26.370,00 | 10,00 | 19,80 | 33,5753 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 25.030,00 | 9,90 | 20,00 | 32,5163 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 25.430,00 | 10,00 | 20,00 | 32,3785 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 25.460,00 | 9,90 | 20,00 | 33,0749 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 26.130,00 | 10,00 | 19,90 | 33,2697 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 27.490,00 | 10,00 | 20,00 | 35,0014 |
| $T_R-6\%$ | 2 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 26.760,00 | 9,80 | 19,90 | 35,4768 |
| $T_R-6\%$ | 2 | 20/10/2020 | 17/11/2020 | 27.160,00 | 10,00 | 20,00 | 34,5812 |

APÊNDICE H – Ensaio de resistência à compressão traço T_R -10%

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | |  CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS | | | |
|---|----------|--|--------------------|---|---------------|-------------|--------------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Força (kg) | Diâmetro (cm) | Altura (cm) | Resistência à compressão (MPa) |
| T_R -10% | 1 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 23.130,00 | 9,90 | 20,00 | 30,0480 |
| T_R -10% | 1 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 22.550,00 | 10,00 | 20,00 | 28,7116 |
| T_R -10% | 1 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 23.120,00 | 9,90 | 20,20 | 30,0350 |
| T_R -10% | 1 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 22.380,00 | 9,90 | 20,10 | 29,0737 |
| T_R -10% | 1 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 22.850,00 | 9,90 | 20,10 | 29,6842 |
| T_R -10% | 1 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 23.310,00 | 9,90 | 20,00 | 30,2818 |
| T_R -10% | 1 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 23.230,00 | 10,00 | 20,00 | 29,5774 |
| T_R -10% | 2 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 22.080,00 | 9,90 | 20,00 | 28,6839 |
| T_R -10% | 2 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 22.370,00 | 9,90 | 20,10 | 29,0607 |
| T_R -10% | 2 | 11/11/2020 | 09/12/2020 | 23.490,00 | 9,90 | 20,00 | 30,5157 |

APÊNDICE I – Ensaios de resistência à tração na flexão traço padrão (T-0)

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO | | | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|-------------------------|--------|---|--------|-----------|----------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Ruptura no terço médio? | l (mm) | b (mm) | d (mm) | Força (N) | Resistência à tração (MPa) |
| TO | 1 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 99,00 | 16382,70 | 4,9650 |
| TO | 1 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | SIM | 300,00 | 102,00 | 100,00 | 16088,40 | 4,7319 |
| TO | 2 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 100,00 | 15499,80 | 4,6969 |
| TO | 2 | 10/08/2020 | 07/09/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 100,00 | 16284,60 | 4,9347 |
| TO | 3 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | SIM | 300,00 | 102,00 | 98,00 | 15009,30 | 4,5965 |
| TO | 3 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 100,00 | 15499,80 | 4,6039 |
| TO | 3 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 99,00 | 15499,80 | 4,7444 |
| TO | 4 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 99,00 | 17854,20 | 5,5202 |
| TO | 4 | 11/08/2020 | 08/09/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 100,00 | 15303,60 | 4,5456 |
| TO | 5 | 17/08/2020 | 14/09/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 101,00 | 16186,50 | 4,8084 |

APÊNDICE J – Ensaios de resistência à tração na flexão traço $T_p-2\%$

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO | | | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|-------------------------|--------|---|--------|-----------|----------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Ruptura no terço médio? | l (mm) | b (mm) | d (mm) | Força (N) | Resistência à tração (MPa) |
| $T_p-2\%$ | 1 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 98,00 | 14322,60 | 4,4297 |
| $T_p-2\%$ | 1 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 100,00 | 15401,70 | 4,7148 |
| $T_p-2\%$ | 1 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 101,00 | 15205,50 | 4,5169 |
| $T_p-2\%$ | 1 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 301,00 | 99,00 | 101,00 | 14616,90 | 4,3566 |
| $T_p-2\%$ | 1 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 98,00 | 17658,00 | 5,5158 |
| $T_p-2\%$ | 1 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 99,00 | 15794,10 | 4,7866 |
| $T_p-2\%$ | 2 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 300,00 | 102,00 | 98,00 | 15597,90 | 4,7768 |
| $T_p-2\%$ | 2 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 15499,80 | 4,6499 |
| $T_p-2\%$ | 2 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 301,00 | 100,00 | 100,00 | 14420,70 | 4,3406 |
| $T_p-2\%$ | 2 | 23/09/2020 | 21/10/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 100,00 | 14518,80 | 4,3996 |

APÊNDICE K – Ensaios de resistência à tração na flexão traço T_p -6%

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO | | | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|-------------------------|--------|---|--------|-----------|----------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Ruptura no terço médio? | l (mm) | b (mm) | d (mm) | Força (N) | Resistência à tração (MPa) |
| T_p -6% | 1 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 99,00 | 16873,20 | 5,2169 |
| T_p -6% | 1 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 100,00 | 17069,40 | 5,0701 |
| T_p -6% | 1 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 100,00 | 17265,60 | 5,2854 |
| T_p -6% | 1 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 101,00 | 16677,00 | 5,0046 |
| T_p -6% | 1 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 16873,20 | 5,0620 |
| T_p -6% | 2 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 102,00 | 98,00 | 17363,70 | 5,3175 |
| T_p -6% | 2 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 99,00 | 18639,00 | 5,6487 |
| T_p -6% | 2 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 99,00 | 17952,30 | 5,4950 |
| T_p -6% | 2 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 18148,50 | 5,4446 |
| T_p -6% | 2 | 23/10/2020 | 20/11/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 17461,80 | 5,2385 |

APÊNDICE L – Ensaio de resistência à tração na flexão traço T_p -10%

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO | | | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|-------------------------|--------|---|--------|-----------|----------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Ruptura no terço médio? | l (mm) | b (mm) | d (mm) | Força (N) | Resistência à tração (MPa) |
| T_p -10% | 1 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 19914,30 | 5,9743 |
| T_p -10% | 1 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 100,00 | 18246,60 | 5,5293 |
| T_p -10% | 1 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 101,00 | 18148,50 | 5,3912 |
| T_p -10% | 1 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 98,00 | 16775,10 | 5,1882 |
| T_p -10% | 1 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 99,00 | 21189,60 | 6,6183 |
| T_p -10% | 1 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 102,00 | 98,00 | 15499,80 | 4,7467 |
| T_p -10% | 2 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 102,00 | 15499,80 | 4,5606 |
| T_p -10% | 2 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 100,00 | 15205,50 | 4,6547 |
| T_p -10% | 2 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 99,00 | 14224,50 | 4,3109 |
| T_p -10% | 2 | 16/11/2020 | 14/12/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 98,00 | 17069,40 | 5,2792 |

APÊNDICE M – Ensaio de resistência à tração na flexão traço $T_R-2\%$

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO | | | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|-------------------------|--------|---|--------|-----------|----------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Ruptura no terço médio? | l (mm) | b (mm) | d (mm) | Força (N) | Resistência à tração (MPa) |
| $T_R-2\%$ | 1 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 99,00 | 17461,80 | 5,3449 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 18933,30 | 5,6800 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 102,00 | 16873,20 | 4,9145 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 102,00 | 16677,00 | 4,8574 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 98,00 | 17167,50 | 5,3095 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 15990,30 | 4,7971 |
| $T_R-2\%$ | 1 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 98,00 | 15205,50 | 4,7497 |
| $T_R-2\%$ | 2 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 99,00 | 16382,70 | 5,1169 |
| $T_R-2\%$ | 2 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 102,00 | 98,00 | 16382,70 | 5,0171 |
| $T_R-2\%$ | 2 | 29/09/2020 | 27/10/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 99,00 | 16088,40 | 4,8758 |

APÊNDICE N – Ensaio de resistência à tração na flexão traço $T_R-6\%$

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO | | | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|-------------------------|--------|---|--------|-----------|----------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Ruptura no terço médio? | l (mm) | b (mm) | d (mm) | Força (N) | Resistência à tração (MPa) |
| $T_R-6\%$ | 1 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 101,00 | 16578,90 | 4,9752 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 102,00 | 16186,50 | 4,7145 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 102,00 | 15107,40 | 4,4002 |
| $T_R-6\%$ | 1 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 99,00 | 14616,90 | 4,4298 |
| $T_R-6\%$ | 2 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 99,00 | 14616,90 | 4,4741 |
| $T_R-6\%$ | 2 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 99,00 | 100,00 | 13832,10 | 4,1915 |
| $T_R-6\%$ | 2 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 100,00 | 14322,60 | 4,3845 |
| $T_R-6\%$ | 2 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 102,00 | 14813,10 | 4,3585 |
| $T_R-6\%$ | 2 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 99,00 | 16284,60 | 4,9846 |
| $T_R-6\%$ | 2 | 29/10/2020 | 26/11/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 13930,20 | 4,1791 |

APÊNDICE O – Ensaios de resistência à tração na flexão traço T_R -10%

|  | | CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO | | | |  <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small> | | | |
|---|----------|--|--------------------|-------------------------|--------|---|--------|-----------|----------------------------|
| Traço | Betonada | Data de moldagem | Data de Rompimento | Ruptura no terço médio? | l (mm) | b (mm) | d (mm) | Força (N) | Resistência à tração (MPa) |
| T_R -10% | 1 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 14126,40 | 4,2379 |
| T_R -10% | 1 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 102,00 | 98,00 | 15696,00 | 4,8068 |
| T_R -10% | 1 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 102,00 | 15205,50 | 4,4740 |
| T_R -10% | 2 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 98,00 | 101,00 | 16775,10 | 5,0341 |
| T_R -10% | 2 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 99,00 | 15009,30 | 4,5487 |
| T_R -10% | 2 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 101,00 | 100,00 | 15794,10 | 4,6913 |
| T_R -10% | 2 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 102,00 | 98,00 | 16382,70 | 5,0171 |
| T_R -10% | 2 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 14813,10 | 4,4439 |
| T_R -10% | 2 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 100,00 | 14126,40 | 4,2379 |
| T_R -10% | 2 | 20/11/2020 | 18/12/2020 | SIM | 300,00 | 100,00 | 99,00 | 14420,70 | 4,4140 |

APÊNDICE P – Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica para todos os traços

| Parâmetros | TRAÇO | T0 | TRAÇO | T0 | TRAÇO | T0 | TRAÇO | T0 |
|----------------|--------------------------|----|--------------------------|----|--------------------------|----|--------------------------|----|
| | CP | 1 | CP | 2 | CP | 3 | CP | 4 |
| $m_s =$ | 3588,00 g | | 3550,00 g | | 3598,00 g | | 3564,00 g | |
| $m_i =$ | 2210,00 g | | 2175,00 g | | 2170,00 g | | 2160,00 g | |
| $m_{sat} =$ | 3725,00 g | | 3690,00 g | | 3730,00 g | | 3695,00 g | |
| $A =$ | 3,82 % | | 3,94 % | | 3,67 % | | 3,68 % | |
| $I_v =$ | 9,04 % | | 9,24 % | | 8,46 % | | 8,53 % | |
| $\rho_s =$ | 2,3683 g/cm ³ | | 2,3432 g/cm ³ | | 2,3064 g/cm ³ | | 2,3218 g/cm ³ | |
| $\rho_{sat} =$ | 2,4587 g/cm ³ | | 2,4356 g/cm ³ | | 2,3910 g/cm ³ | | 2,4072 g/cm ³ | |
| $\rho_r =$ | 2,6038 g/cm ³ | | 2,5818 g/cm ³ | | 2,5196 g/cm ³ | | 2,5385 g/cm ³ | |

| Parâmetros | TRAÇO | T_p -2% |
|----------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| | CP | 1 | CP | 2 | CP | 3 | CP | 4 |
| $m_s =$ | 3590,00 g | | 3560,00 g | | 3560,00 g | | 3610,00 g | |
| $m_i =$ | 2170,00 g | | 2150,00 g | | 2150,00 g | | 2180,00 g | |
| $m_{sat} =$ | 3750,00 g | | 3720,00 g | | 3715,00 g | | 3745,00 g | |
| $A =$ | 4,46 % | | 4,49 % | | 4,35 % | | 3,74 % | |
| $I_v =$ | 10,13 % | | 10,19 % | | 9,90 % | | 8,63 % | |
| $\rho_s =$ | 2,2722 g/cm ³ | | 2,2675 g/cm ³ | | 2,2748 g/cm ³ | | 2,3067 g/cm ³ | |
| $\rho_{sat} =$ | 2,3734 g/cm ³ | | 2,3694 g/cm ³ | | 2,3738 g/cm ³ | | 2,3930 g/cm ³ | |
| $\rho_r =$ | 2,5282 g/cm ³ | | 2,5248 g/cm ³ | | 2,5248 g/cm ³ | | 2,5245 g/cm ³ | |

| Parâmetros | TRAÇO T _R -2% |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 |
| m _s = | 3575,00 g | 3555,00 g | 3600,00 g | 3545,00 g |
| m _i = | 2150,00 g | 2155,00 g | 2165,00 g | 2110,00 g |
| m _{sat} = | 3715,00 g | 3710,00 g | 3750,00 g | 3690,00 g |
| A = | 3,92 % | 4,36 % | 4,17 % | 4,09 % |
| l _v = | 8,95 % | 9,97 % | 9,46 % | 9,18 % |
| ρ _s = | 2,2843 g/cm ³ | 2,2862 g/cm ³ | 2,2713 g/cm ³ | 2,2437 g/cm ³ |
| ρ _{sat} = | 2,3738 g/cm ³ | 2,3859 g/cm ³ | 2,3659 g/cm ³ | 2,3354 g/cm ³ |
| ρ _r = | 2,5088 g/cm ³ | 2,5393 g/cm ³ | 2,5087 g/cm ³ | 2,4704 g/cm ³ |

| Parâmetros | TRAÇO T _p -6% |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 |
| m _s = | 3570,00 g | 3565,00 g | 3570,00 g | 3520,00 g |
| m _i = | 2170,00 g | 2175,00 g | 2170,00 g | 2140,00 g |
| m _{sat} = | 3735,00 g | 3745,00 g | 3740,00 g | 3690,00 g |
| A = | 4,62 % | 5,05 % | 4,76 % | 4,83 % |
| l _v = | 10,54 % | 11,46 % | 10,83 % | 10,97 % |
| ρ _s = | 2,2812 g/cm ³ | 2,2707 g/cm ³ | 2,2739 g/cm ³ | 2,2710 g/cm ³ |
| ρ _{sat} = | 2,3866 g/cm ³ | 2,3854 g/cm ³ | 2,3822 g/cm ³ | 2,3806 g/cm ³ |
| ρ _r = | 2,5500 g/cm ³ | 2,5647 g/cm ³ | 2,5500 g/cm ³ | 2,5507 g/cm ³ |

| Parâmetros | TRAÇO T _R -6% |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 |
| m _s = | 3560,00 g | 3565,00 g | 3555,00 g | 3505,00 g |
| m _i = | 2135,00 g | 2140,00 g | 2135,00 g | 2100,00 g |
| m _{sat} = | 3705,00 g | 3705,00 g | 3700,00 g | 3645,00 g |
| A = | 4,07 % | 3,93 % | 4,08 % | 3,99 % |
| l _v = | 9,24 % | 8,95 % | 9,27 % | 9,06 % |
| ρ _s = | 2,2675 g/cm ³ | 2,2780 g/cm ³ | 2,2716 g/cm ³ | 2,2686 g/cm ³ |
| ρ _{sat} = | 2,3599 g/cm ³ | 2,3674 g/cm ³ | 2,3642 g/cm ³ | 2,3592 g/cm ³ |
| ρ _r = | 2,4982 g/cm ³ | 2,5018 g/cm ³ | 2,5035 g/cm ³ | 2,4947 g/cm ³ |

| Parâmetros | TRAÇO T _p -10% |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 |
| m _s = | 3625,00 g | 3550,00 g | 3550,00 g | 3545,00 g |
| m _i = | 2185,00 g | 2145,00 g | 2140,00 g | 2135,00 g |
| m _{sat} = | 3755,00 g | 3690,00 g | 3690,00 g | 3685,00 g |
| A = | 3,59 % | 3,94 % | 3,94 % | 3,95 % |
| l _v = | 8,28 % | 9,06 % | 9,03 % | 9,03 % |
| ρ _s = | 2,31 g/cm ³ | 2,30 g/cm ³ | 2,29 g/cm ³ | 2,29 g/cm ³ |
| ρ _{sat} = | 2,39 g/cm ³ | 2,39 g/cm ³ | 2,38 g/cm ³ | 2,38 g/cm ³ |
| ρ _r = | 2,52 g/cm ³ | 2,53 g/cm ³ | 2,52 g/cm ³ | 2,51 g/cm ³ |



Determinação da massa específica, absorção e índice de vazios do concreto endurecido – NBR 9778



| Parâmetros | TRAÇO T _R -10% |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 |
| m _s = | 3485,00 g | 3515,00 g | 3550,00 g | 3580,00 g |
| m _i = | 2095,00 g | 2105,00 g | 2120,00 g | 2130,00 g |
| m _{sat} = | 3635,00 g | 3655,00 g | 3685,00 g | 3695,00 g |
| A = | 4,30 % | 3,98 % | 3,80 % | 3,21 % |
| l _v = | 9,74 % | 9,03 % | 8,63 % | 7,35 % |
| ρ _s = | 2,26 g/cm ³ | 2,27 g/cm ³ | 2,27 g/cm ³ | 2,29 g/cm ³ |
| ρ _{sat} = | 2,36 g/cm ³ | 2,36 g/cm ³ | 2,35 g/cm ³ | 2,36 g/cm ³ |
| ρ _r = | 2,51 g/cm ³ | 2,49 g/cm ³ | 2,48 g/cm ³ | 2,47 g/cm ³ |